

第2章 状態情報取得のための技術・手法の overview

本小委員会では、鋼構造物の状態情報取得のためのイノベーション技術に関する議論を進めてきたが、本小委員会では、イノベーション技術を以下のようなカテゴリー（トピック）に分けて、検討事例の共有、議論を行った。ここでは、小委員会委員各位が、それぞれイノベティブさを有していると考えた技術の検討事例について共有・議論することにより、鋼構造物の状態情報取得のためのイノベーション技術の現状について概観することを目的としている。

なお、重要なこととして、各カテゴリーの技術はここで扱う技術のほかにも多くの検討がなされているが、ここでは、小委員会のメンバーが開発技術者としてかかわった技術や、イノベティブな部分を含んでいると考えられる技術をピックアップして、特徴的な点について議論し、また可能な限り開発時の工夫やハードルなどにも言及することで、今後のイノベーション技術の開発の際参考として貢献できる資料とすることを目指していることを触れさせて頂きたい。

以下、カテゴリーごとに以下のような節を設け、イノベーション技術の紹介を進めることとする。

- 2.1 点検における情報取得の高度化（カテゴリー①）
- 2.2 計測・データ分析技術の開発（カテゴリー②）
- 2.3 電源・発電に関する技術（カテゴリー③）
- 2.4 状態情報に関するプレゼンテーション技術（カテゴリー④）
- 2.5 状態情報を用いた状態診断（カテゴリー⑤）

2.1 点検における情報取得の高度化（カテゴリー①）

点検においては、これまで主に目視により実施されるようになり、また、近年になり道路構造物である橋梁やトンネルに対しては、近接目視点検によるものが基本となっている。一方、点検では、打音検査などが適用されることもあり、計測等による構造物の状態に関する情報取得についても今後展開される可能性がある。

ここでは、点検において適用されることで新しい情報の取得等、情報取得の高度化につながる技術として検討が進められている以下の4技術を紹介する。

- ・ マイクロフォンと AI による打音点検技術
- ・ 表面吸着による移動を適用した橋梁点検ロボットの検討
- ・ 非破壊計測（渦電流計測）による腐食状態分析
- ・ 非破壊計測技術（渦電流、超音波）による高力ボルト軸力評価

【イノベーション技術の名称・タイトル】

マイクロフォンとAIによる打音点検技術

【概要】

本技術は、現場でのコンクリート構造物の点検で行われる打音検査をセンサとデータ解析によって定量化を行う技術である。打撃時の衝撃荷重と打音計測により、コンクリート内部の空隙を検出し、かつ熟練検査員と同等レベルの深さの空隙を検出できる技術である。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

橋梁やカルバートなどのコンクリート構造物の空隙・剥離の非破壊検査の一つに打音検査があり、実務で幅広く使われている。これまでも打音検査の定量的評価やロボットによる自動化を目的として、打撃時の振動応答をマイクや振動センサ等で計測・分析してコンクリート内部の欠陥を検知する打音法が行われてきた。検査の定量化や自動化に関する研究開発が進む一方で、検査員による従来の打音検査を代替・補助するには検査時間やコスト、機械に代替させることへの管理者側の心理的な障壁が課題であった。マイクロフォンは非接触で打音応答を計測できるため、小型化した機器を検査員に取り付けることで通常の打音検査とほとんど変わらない検査環境を実現しやすい。一方、空隙の深さが10cm近くになると熟練者でも検出が容易ではないといわれており、深さ10cmまでの空隙欠陥の検出が可能となれば、検査員による診断を代替できると考え、研究の着想に至った。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

コンクリート内部に人工的に埋め込んだ様々な深さ、直径の空隙欠陥を対象として、打音応答の特徴を整理し、スペクトルの重心周波数や波形面積など独自の指標を提案しながら波形の特徴を明らかにしている。全結合ニューラルネットワークを用いて欠陥検出を行う上で、ランダム性が強い衝撃荷重に対して、データを正規化するのではなく変数として扱うことで精度向上を図った点において独自性を見出すことができる。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

構造物に合わせたガイドフレームを搭載した走行式装置や、UAV（Unmanned Aerial Vehicle）などのロボティクス技術への期待が高まっているが、機器のコストや操作、運用方法の構築など地方自治体での導入のハードルも高いのが課題である。一方、覆いをつけたセンサ部を検査面に押し当てて打音法による応答を観測・分析する方法が提案・製品化されており、環境ノイズを物理的に削減している[1]。速度計や加速度計などの接触式センサは打音法による振動応答を直接計測する分ノイズレベルが小さいが、検査効率に課題があるといえる。教師なし学習の自己組織化マップ[2]やパターン認識[3]、教師あり学習では弱学習器のアンサンブル学習[4]やニューラルネットワーク[5]などの機械学習を用いて欠陥検知を行う方法がある。しかし、深い欠陥の検出は健全部との差異がほとんど生じないため、外れ値を利用する教師なし学習やランダムフォレストのような弱学習器は困難な可能性が高い。当該技術は、熟練技術者を代替できる打音検査技術として10cm程度までの深い空隙欠陥を対象とした位置づけとなっている。

-
- [1] 磯光夫, 久保田和徳, 越後滋, 橘吉宏, 歌川紀之, 中島章典: 鋼板で覆われた床版の打音法による非破壊検査に関する研究, 土木学会論文集 F4, 69 巻, 2 号, pp.140-155, 2013.
 - [2] 黒田千歳, 歌川紀之, 島田拓夢, 安永守利: 自己組織化マップ(SOM)による打音法の結果評価, 佐藤工業技術研究所報, 41 号, pp.23-26, 2016.
 - [3] 大曲正紘, 園田佳巨, 宗本理: 劣化したコンクリート橋の回転式打音検査に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, 31 巻, 1 号, pp.2143-2148, 2009.
 - [4] Fujii, H., Yamashita, A. and Asama, H.: Defect Detection with Estimation of Material Condition using Ensemble Learning for Hammering Test, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp. 3847-3854, 2016.
 - [5] 江本久雄, 馬場 那仰, 浅野 寛元, 長瀬 大和: AI 手法による打音検査の浮き判定の検討, AI・データサイエンス論文集, 1 巻, J1 号, pp.514-521, 2020.

【技術の内容紹介】

打音検査では検査員がハンマーで対象物を叩き, その時の打撃応答を耳や手で感じとり, 異常の有無を判断する. 本研究ではハンマーの衝撃荷重をインパルスハンマーで, 打音をマイクロフォンで収集し, それらのデータを分析することで空隙欠陥の有無を識別することを目的としている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾. 図 1 に衝撃荷重と音圧データの時刻歴波形と得られる特徴量の例を示す¹⁾. 例えば衝撃荷重の特徴量では, 力積や継続時間, ピーク衝撃荷重などが挙げられる. 音圧の特徴量としては初期ピーク音圧や音圧波形面積, 周波数スペクトルの面積やその重心周波数などを挙げている. 得られる多数の特徴量から有意な特徴量を抽出するため, 特徴選択アルゴリズムを用いて特徴量の重要度評価を行っている. 図 2 は重要度が高いと評価された 4 つの特徴量を, 欠陥と健全に分けた分布で示している. 例えば欠陥部では最大衝撃荷重は小さい傾向がみられる一方, 衝撃荷重の継続時間は長い傾向であることがわかる. これらの特徴量に注目し, 分布の違いを総合的に判断することで欠陥と健全を識別するため, 本研究では機械学習の 1 つであるニューラルネットワークを用いた.

できるだけ汎用的でシンプルな構成とするため, 試行錯誤の結果, 図 3 のような中間層が 2 層の全結合ニューラルネットワークを構築した. 特徴量は, 特徴選択アルゴリズムで評価した重要度が高い順に 10 個の特徴量と, 打撃位置からの距離と最大衝撃荷重の 2 つを加えた 12 個とした. 打撃位置からの距離は衝撃荷重と音圧初期ピークの時間ズレから求めている. 打撃位置からの距離と最大衝撃荷重を加えた理由は, これらは距離減衰とエネルギー量に直接関係し, 音圧データの振幅に強く影響を及ぼすため, 考慮すべき特徴量であるためである. なお, 既往研究では距離減衰やエネルギー量は計測データの前処理で考慮していた.

検証に用いた試験体を図 4 に示す. 発泡スチロールを埋設した人工的な空隙欠陥があり, 深さや直径がそれぞれ異なっている. 対象の欠陥中心から同心円状に幅 5cm ずつのリングを描き, その間の領域をランダムに打撃してデータを収集した. 各計測は 20 秒間でサンプリングは 50kHz とした. 対象の欠陥を除いたデータで学習して評価する交差検証を行った. 図 5 に示すように, 深さ 8cm 以下で約 8 割以上の正解率が得られており, 欠陥中心付近では再現率はさらに 1 割ほど高い結果であった¹⁾. ただし, 深さ 10cm の空隙は直径 20cm 以下では検出が困難であったことや, 航空機などの騒音の影響で検出率が低下することが課題であり, マイクの設置位置や計測方法を変えるなどの検討を進めている.

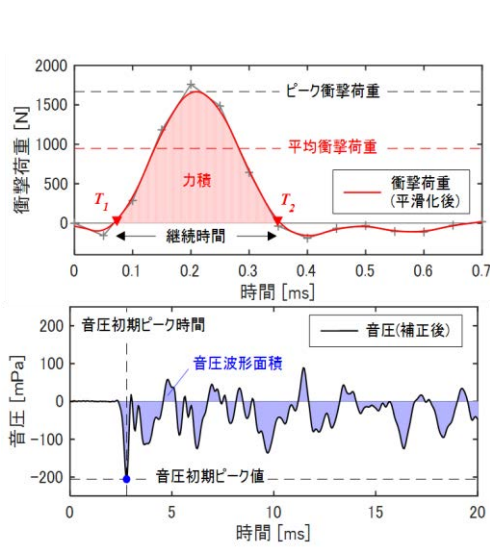


図1 打音法で収集した衝撃荷重と音圧波形と特徴量の例²⁾

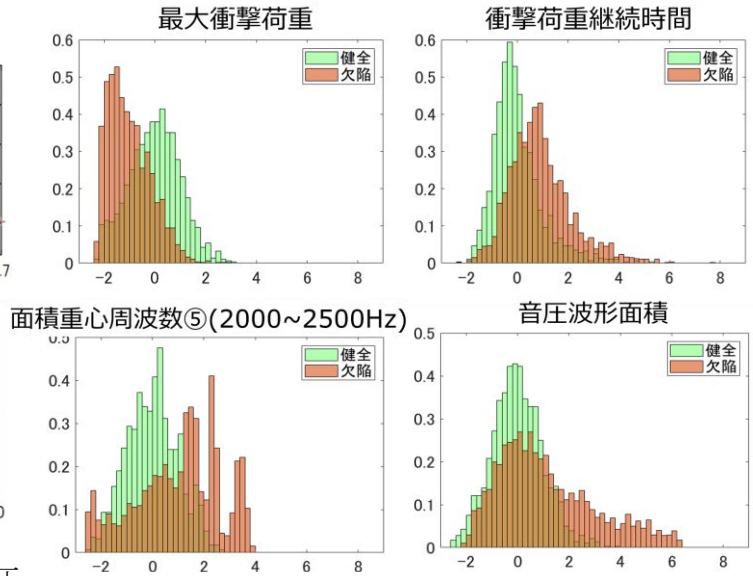


図2 欠陥・健全データの特徴量の違いの例

層数 (ノード数)	入力層 : 1 (12) 全結合層 : 2 (18, 18) 出力層 : 1 (2)
活性化関数	Tan-Sigmoid
学習関数	SGDM
ミニバッチサイズ	200
学習率	0.001
学習終了条件	分類精度0.90に到達
損失関数	交差エントロピー
入力データ (数)	特徴量ベクトル (12)
出力データ (数)	欠陥の有無(2)

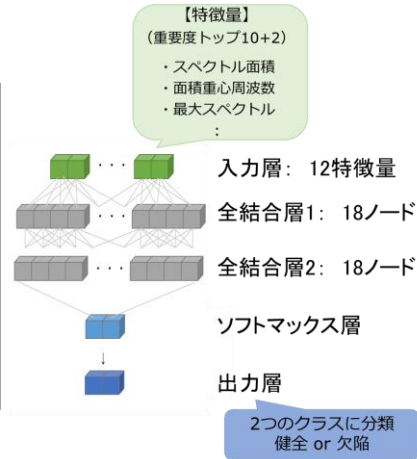


図3 特徴量を入力とした全結合ニューラルネットワークの概要

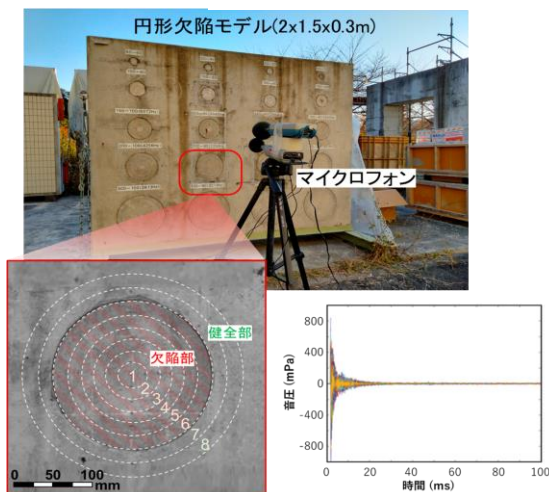


図4 検証に用いた空隙欠陥を有するコンクリート試験体

		欠陥の大きさ			
		小さい			大きい
		R=10cm	R=15cm	R=20cm	R=30cm
浅い	d=4cm	92.0%	58.2%	93.3%	85.4%
		環境音・風が原因?			
欠陥の深さ	d=6cm	88.3%	78.6%	90.9%	91.4%
	d=8cm	80.7%	80.3%	78.4%	90.5%
	d=10cm	—	54.8%	36.5%	85.5%

図5 空隙の深さ・大きさ別の正解率

【技術開発時の話】

土木分野で AI を活用させたいという社会的な要望から、振動応答と AI でなにかできないかと考えていたところ、ある研究者から打音データを提供して頂いた。そこではじめて打音検査と向き合うこととなり、勉強していくうちに、打音検査のロボット化の研究が進んでいることを知った。一方で、ある地方自治体の土木担当の方々に何度かお会いする機会があり、打音検査の自動化への需要を率直にお伺いしたところ、ロボット化は面白いと思うが（うちの導入は）難しいとご意見を頂いた。自治体は多くの土木構造物を管理している中で点検業務を委託することはコスト面で難しい現状があり、そのうえで導入コストが高いものは敷居が高いと言わざるを得なかった。そこで、「人が打撃、機械で診断」ということに特化した技術が必要なのではと考え開発を進めてきた。研究を進める中で、点検者による打撃は等間隔ではなく、例えば要注意箇所では密集して叩いていることに注目し、叩いた箇所の診断に加えて、その診断結果が適用できる影響範囲を推定することで点検効率を向上させることも検討を行った²³⁾⁴⁾。「人が打撃、機械で診断」の副次的なメリットとして、技術者養成のための教材としても使用できることである。多くの方の協力のもと、徐々にではあるが目標としている熟練技術者相当まで欠陥検出精度を上げることができたと考えている。汎用性についてはさらに多くの検証が必要である。

【技術の限界・今後の課題等】

実際のコンクリート構造物は、構造物によって水セメント比や強度などが異なり、場所によって濡れていたり、表面の凹凸や劣化状態が異なるなど、打音応答に影響し得る様々な因子を含んでおり、これらの因子をすべて考慮した汎用的な検査システムを構築することは難しいと考えられる。一方で、打音検査員はこれらの因子を知識や目視等である程度把握しながら、打音や表面振動の違いを捉えることで相対的に欠陥を判断している面がある。打音検査の機械化においても、検査対象の壁面で明らかに健全な場所でキャリブレーションをかけることが解決策として考えられる。このほか、カメラやレーザー計測に表面状態の取得など、技術の併用によって影響因子を定量化することが解決策として考えられる。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) 竹谷晃一，日高時音，佐々木栄一：無筋コンクリートの空隙欠陥を対象としたマイクロフォン計測によるスマート打音法，安全工学シンポジウム 2022，安全工学シンポジウム 2022 講演予稿集，日本学術会議，OS-8-3, 2022.
- 2) 竹谷 晃一，佐々木 栄一，范 書舒，伊藤 裕一：時間・周波数領域の特徴量評価とニューラルネットワークを用いた打音法の感度向上と効率化，AI・データサイエンスシンポジウム，AI・データサイエンス論文集，土木学会，Vol. 2, No. J2, pp.721-732, 2021.
- 3) Shushu Fan, Kouichi Takeya, Eiichi Sasaki. Evaluation method of defects in concrete structures using hammer test by time-frequency analysis and neural networks, IABSE Congress Ghent 2021- Structural Engineering for Future Societal Needs, International Associating for Bridge and Structural Engineering, pp. 955-964, 2021.
- 4) 竹谷晃一，范書舒，佐々木栄一，伊藤裕一：時間周波数分析とニューラルネットを活用した影響範囲推定による打音法の効率化，令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，公益社団法人土木学会，2021.

【イノベーション技術の名称・タイトル】

表面吸着による移動を適用した橋梁点検ロボットの検討

【概要】

目視点検困難箇所の点検等を行う目的で、橋梁点検用のロボットの開発検討がなされている。ロボットの開発は多くなされているが、鋼橋を対象とした検討の事例として、部材表面、部材内部を移動しながら観察や計測を行うロボットとして、表面吸着による移動方法を適用した橋梁（鋼橋）点検ロボットに関する検討の例を紹介する。鋼部材の表面を移動する方法として、当初磁力を用いた移動方法を適用したロボットモデルを提示していたが、コンクリートなどの材料に対しても表面吸着し移動する方法を適用した軽量小型ロボットの開発がなされた¹⁾⁻³⁾。当該小型ロボットでは、画像による分析のほか、振動分析、腐食状態分析を可能とするデータ収集がなされる。

【背景、着想に至った経緯（背景）と考えられること】

目視点検困難箇所として、鋼橋で考えられる部位として、箱断面内部、アクセス困難な部位などが考えられた。目視点検困難箇所においても、状態を把握することが重要であるとして、部材内部に侵入でき自走する小型ロボットの開発がなされた。この際、当初磁力による部材表面での移動が考えられ、ボルト孔からの進入などができる小型点検ロボットが提案された。しかしながら、鋼橋において、鋼部材表面では、さびなどで凹凸が発生することや、コンクリートなどが使用されている部位もあるといったことから、磁力による部材表面移動には限界があり、様々な部材表面状態に対応すべく、表面吸着を利用した移動方法の検討がなされた。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

鋼橋の部材には、腐食による表面の凹凸のほか、コンクリートを利用した部分もあるなど、磁力による移動が困難な箇所が多く存在しているため、真空吸着にできる限り近くなるような吸着部について検討し、様々な表面状態における移動を可能とした点で特徴を有する。鋼部材のみならずコンクリート部位においても移動できる可能性を示している。また、吸着することにより、小型点検ロボットとその位置の鋼部材は一体化したような挙動となり、様々な鋼部材における振動の計測を行えるロボットであることなどが確認されている。小型点検ロボットは部品を3Dプリンターで製作するなどにより軽量化が図られている。本体部分で、328g程度の重量となるモデルも提案されている。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

橋梁点検を目的としたロボット技術は多岐にわたり検討がなされている。ここで紹介している小型点検ロボットは、表面吸着による移動を可能とした吸着部の提案に基づくものであり、移動方法に特徴を有する。当該ロボットは、画像・音情報の取得、振動計測、渦電流による計測等、ロボットにより取得したい情報について、鋼構造、橋梁工学の立場から検討して、開発が進められたものである。

【技術の内容紹介】

図1に示すように鋼，コンクリート等様々な表面状況に対して，吸着により移動しながら観察や計測を行う小型点検ロボットの開発が進められた．小型点検ロボットにより，移動しながら，鋼部材の振動計測が実施できる可能性があることを現場実験により検証している（図2）．図3には，実際の鋼橋現場における適用検証実験の様子を示している．



図1 表面吸着により腐食鋼部材およびコンクリート壁を移動する小型点検ロボット

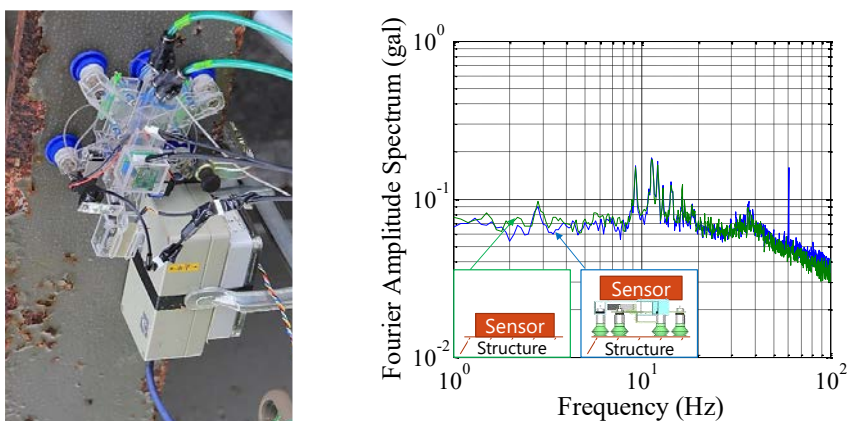


図2 腐食を有する実鋼橋部材における振動計測への適用例



図3 実橋梁での適用検証実験の様子

【技術開発時の話】

橋梁用点検ロボットは、目視点検困難箇所、アクセス困難箇所の観察、情報収集を目的として開発が進められてきたものである。鋼橋を対象と考えた場合、部材表面に塗膜やさび層などがあることから、当初磁力による接着、移動を可能とする自走式点検ロボットとして開発が進められていた。しかしながら、部材の表面状況によっては、接着が困難となる場合があり、特にコンクリート床版などもある鋼橋においては、適用できる箇所や条件が限られていた。そこで、表面に真空に近い状態で吸着するデバイス・吸着部を開発することで、コンクリートなどの表面も移動できるように工夫することとした。一方で、必要となる吸着力を減らすため、点検ロボットの軽量化も行うことで、これを実現できることとなった。

【技術の限界・今後の課題等】

鋼橋には、多くの板やボルト継手等の段差があり、それを乗り越えるための工夫が必要となる。また、コンクリートに深いひび割れが生じている場合には、真空状態になりにくいことがあり、吸着力が低下することが確認されている。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) Ayako Akutsu, Eiichi Sasaki, Koichi Takeya, Yusuke Kobayashi, Keigo Suzuki, Hiroshi Tamura: A comprehensive study on development of a small sized self-propelled robot for bridge inspection, Structure and Infrastructure Engineering, doi:10.1080/15732479.2016.1236132, 2016.
- 2) Akutsu Ayako, Eiichi Sasaki, Koichi Takeya: Structural Behavior Sensing using Small Sized Self-Propelled Inspection Robot, ICSIC 2016, 2016.
- 3) Akutsu Ayako, Eiichi Sasaki, Koichi Takeya, Yusuke Kobayashi, Keigo Suzuki: Attempts to Develop a Small Sized Self-Propelled Robot for Maintenance of Structures, EASEC-14, 2016.

【イノベーション技術の名称・タイトル】

非破壊計測（渦電流計測）による腐食状態分析

【概要】

現場での鋼構造物の点検時に、簡易に計測することで情報取得の高度化に寄与する可能性のある技術として提案されたものであり、渦電流計測により、腐食さびを除去することなく、また、板の片面から、腐食さびの厚さおよび中に残存している鋼板の板厚を非破壊的に計測する技術である。また、鋼板表面の凹凸などの状況を把握することにも利用できる可能性が示されている。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

腐食損傷を有する鋼部材の残存耐荷力や強度の評価においては、腐食により減肉した量、あるいは、内部に残存している鋼材の板厚の情報が重要であるが、残存板厚の計測は、これまでさびの除去やケレン、表面処理などが伴うことが多く、大変手間がかかるものであった。また、将来的なロボットによる点検（ロボティクス点検）の実現に向けては、軽量で簡易な計測法の確立が不可欠となっていた。渦電流を用いることにより、非磁性体を透過して内部の情報を取得できる可能性があることが知られており、また、周波数を低くすることで渦電流形成がより深い部分までなされることなどが考えられた。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

鋼部材の腐食状態（さび層の厚さ、残存板厚の大きさ）を分析するために、低周波渦電流の適用性を明らかとしている。周波数などの適用条件、計測データからさび層の厚さや残存板厚の大きさを分析するための手順を示しており、それが片面からの計測で簡易に実現できることを示している点で特徴があると考えられる。電圧のみならず、位相に着目した分析方法も開発しており、独自性を見出すことができる。

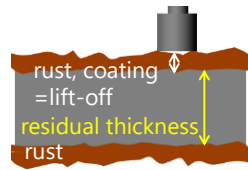
【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

超音波計測やキャリパーによる計測と異なり、表面のさび層の除去や表面処理を想定しておらず、片側からの計測であり、点検時の簡易計測に適した手法の特徴を有している。パルス波を用いた渦電流計測の提案もなされているが、当該技術は、それとは別な手法として低周波を用いて、比較的小さいエネルギーを用いた簡易な計測システムでの構成となっている。

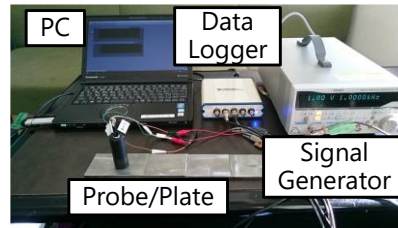
【技術の内容紹介】

腐食により表面にさび層が存在する状況や、塗膜などがある状況で、内部の鋼材の残存板厚を計測する技術として開発検討がなされた。図-1は、計測システムと、様々な板厚に対する計測データの分析の状況を示している。様々な板厚やリフトオフに対するマスターカーブを構築し、任意の腐食状況に対する計測のための基礎情報を得ている。図-2に、腐食部材から切り出した鋼板に対する計測状況を示している。表面はさびにより凹凸があるものの、板厚等を計測できる可能性があることを示している。

想定される計測状況



計測システム



位相を用いた
場合の分析例

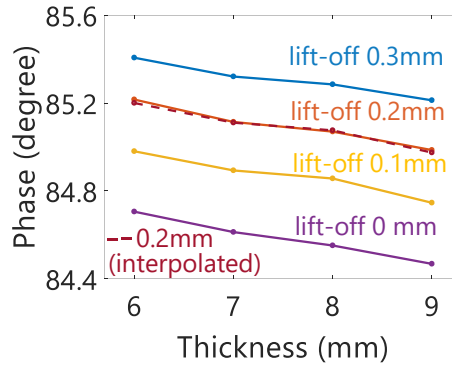
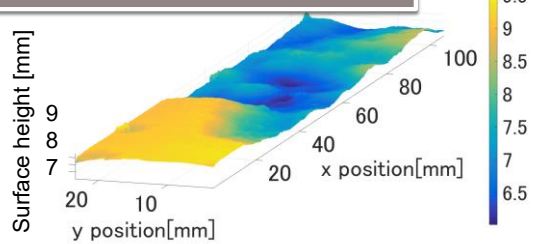


図1 渦電流計測による鋼板の腐食状態分析手法

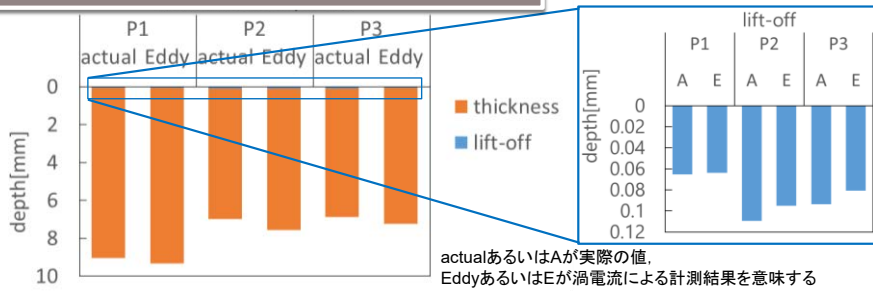
腐食した鋼板



鋼板の表面形状 (レーザー計測の結果の例)



板厚およびリフトオフの計測結果の例



actualあるいはAが実際の値、EddyあるいはEが渦電流による計測結果を意味する

図2 腐食した鋼板に対する板厚およびリフトオフ (さびの厚さに相当すると考えられる) の同時計測例

【技術開発時の話】

従来、渦電流計測は、疲労亀裂の検出などに適用されている非破壊検査技術であり、また部材表面に近い情報を取得することに利用されていたものであるが、低周波を用いることにより、鋼板の内部に浸透し、スキャンするような形となることが動磁場数値シミュレーションで確認されたことから、実際にその実現が可能かどうかについて計測システムを構築し検証を行ったものである。当初検出電圧のみでの計測や評価を行っていたが、位相にも変化が現れることに気が付いたことから、計測できる可能性がより高まったと考えられる。

【技術の限界・今後の課題等】

当該技術は、表面のさび層を除去せず、内部の残存鋼板板厚を計測することを想定しているが、著しい腐食、層状さびやさび層の厚さが著しく大きい場合には、適用が困難となる場合があり、その場合は、ケレンなどの事前処理が必要になると考えられる。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) 阿久津絢子, 佐々木栄一, 蛭沢佑紀, 田村洋: 低周波渦電流による鋼部材の腐食損傷状態分析, 土木学会論文集 A1, Vol.74, No.1, pp.145-156, 2018.
- 2) 阿久津絢子, 佐々木栄一, 田村洋: 位相特性を利用した低周波渦電流による鋼部材の腐食損傷分析手法の構築, 土木学会論文集 A1, Vol.74, No.1, pp.145-156, 2018.

【イノベーション技術の名称・タイトル】

非破壊計測技術（渦電流，超音波）による高力ボルト軸力評価

【概要】

高力ボルト摩擦接合継手においては、高力ボルトに所定の軸力が導入されていることが耐荷力の面から重要であるが、実際には、軸力が低下している可能性も指摘されており、高力ボルトの軸力を定量的に評価する技術の構築が求められている。これまで高力ボルトの軸力を計測する手法として、超音波などによる手法などが示されているが、別なアプローチとして、高力ボルトの頭部がボルト軸力の導入により変形する現象に着目して、変形の程度を非破壊的に、渦電流もしくは超音波による計測を行う技術である。渦電流による計測では、軸力導入に高力ボルト頭部の変形を基本的にリフトオフの変化として計測していると考えられている。一方、超音波による計測の方法のひとつとして、軸力レベルによる高力ボルト頭部の変形状態の違いに起因する計測データの変化を Wavelet 変換によるデータ分析と機械学習を組み合わせることにより検出するという技術が提案されている。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

高力ボルト軸力の計測方法としては、これまで高力ボルトの軸力レベルに応じたボルトの長さ変化を計測する方法などがあったものの、別なアプローチや考え方について検討し、より高精度な方法や、より適用性の高い簡易な方法への展開などが求められていた。渦電流計測においては、腐食鋼板の板厚などを低周波波形を利用することで計測すること等を検討するなかで、内部の健全な鋼板表面までの微小なすき間などをリフトオフとして計測することも同時に確認をしていたことから、この応用として高力ボルトの頭部の変形状況の検知を発想したものである。高力ボルト摩擦接合継手の FE モデル化を別途検討する中で、高力ボルト頭部の変形状況について確認を行っていたこともきっかけとなっている。一方で、超音波計測についても、様々な軸力レベルでの接合面の状況などを検討する中で、ボルト頭部の計測を行い、軸力レベルに応じた特徴があるのではないかと考え、計測された波形等を基に機械学習を行うなどで可能性を検討し、軸力レベルに関連した情報が含まれる計測波形の範囲などを特定し、検討を重ねたものである。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

高力ボルトの軸力レベルによる、高力ボルトの頭部の変形状況の違いに着目して、その違いについて非破壊的に、また定量的に計測を行おうと試みた点において特徴があると考えられる。また、超音波計測による方法においては、変形状態の違いを計測データから検知するために、取得したデータについて Wavelet 変換などで特徴を見出し機械学習と組み合わせるなどで感度を高めようとしている点も特徴であると考えられる。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

従来の方法と比べ、ボルト軸力のレベルに応じて生じる変形状態の変化を捉えようとしている点でアプローチが大きく異なるものと考えられる。

【技術の内容紹介】

図1に、渦電流計測による高力ボルト軸力の検出に関する概念図および軸力レベルに対する検出電圧データの変化について例を示している。軸力レベルに応じて、リフトオフが変化して検出電圧に変化が生じることに起因している。図2は、超音波計測によるボルト軸力の評価について、計測の様子と、機械学習を行って軸力を評価しその精度について検討した例を図で示している。いずれもボルト軸力のレベルの違いによるボルト頭部の変形に着目した、ボルト軸力評価の方法となっている。

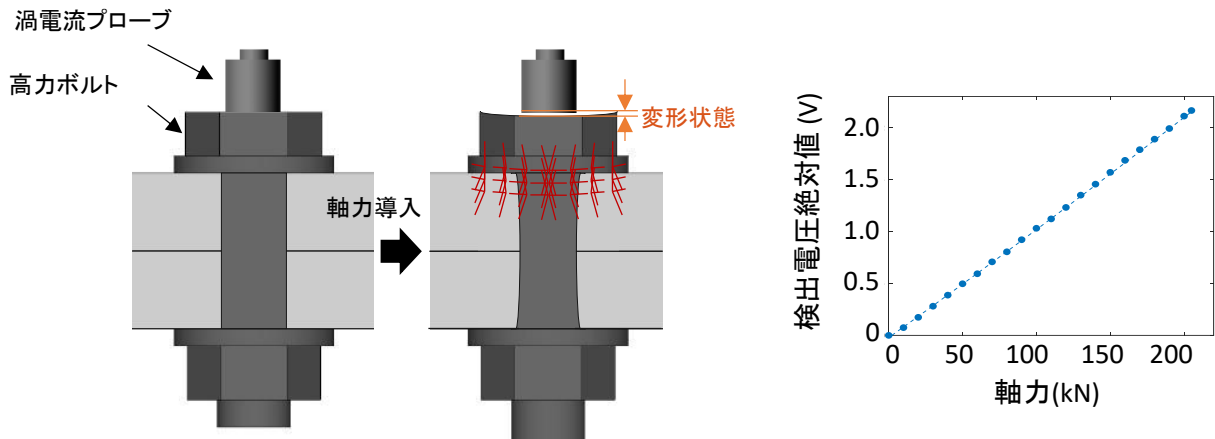


図1 渦電流計測によるボルト軸力の検出に関する検討

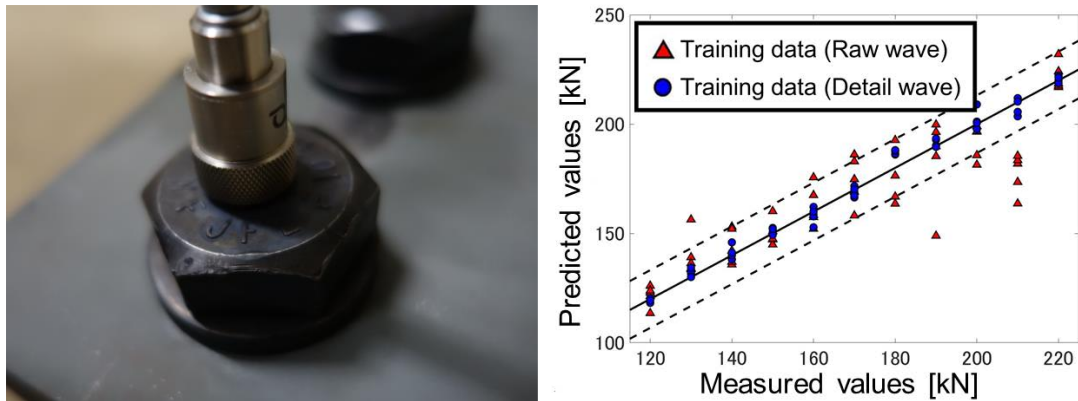


図2 超音波計測によるボルト軸力の評価の試み

【技術開発時の話】

渦電流による計測は、低周波渦電流を用いた鋼板の腐食状況の把握に関する検討から、渦電流計測による応力変化の計測可能性の検討等を経て、高力ボルトの軸力変化に伴う頭部の応力変化等を捉えられないかと応用を考えたものであるが、結果的に、渦電流による計測としては、リフトオフの微小な変化に対して感度がよいことで、高力ボルトの頭部の変形状態を計測することできそうであるということに気が付いたという経緯がある。一方、超音波計測による方法は、摩擦接合継手の接合面の状況とボルト軸力レベルの関係について、様々な場所で計測をしながら、ボルト頭部においても計測を重ね、微小な差異の可能性もあることから複数回の計測データを活用できるよう、機械学習の適用も試みたものである。ボルト軸力に関連した情報を含む波形の抽出などで工夫がなされた。

【技術の限界・今後の課題等】

高力ボルトの頭部が腐食損傷を受けている場合への対応や、高力ボルトの軸が母材と触れている場合などボルト孔とボルト軸の位置関係など、高力ボルトの頭部の変形に影響を与える可能性やその影響の大きさなどについて確認をする必要がある。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) 阿久津絢子，佐々木栄一，田井政行，下里哲弘：渦電流計測に基づく高力ボルト残存軸力評価手法の構築，土木学会論文集 A1, Vol.78, No.2, pp.231-242, 2022.
- 2) 平尾賢生，鈴木啓悟，森田勝実，伊藤裕一，竹谷晃一，佐々木栄一：計測波形分析への機械学習適用による高力ボルト軸力の超音波評価，土木学会論文集 A1, Vol.78, No.1, pp.108-120, 2022.

2.2 計測・データ分析技術の開発（カテゴリー②）

定期点検では、劣化損傷の原因となる事象を確実に把握する必要があるが、点検時にかけられる時間や予算には限りがある。このため、現状の点検では、変状の見落としが生じている。また、変状把握に時間を要すること、直接目視が困難となる部位に対し、定量的に損傷を評価できていないことなどが課題として挙げられる。そこで、計測による定量的なデータ取得・データ分析によって、点検および診断、補修補強後の状態把握を補助できると期待されている。

ここでは、計測およびデータ分析技術の開発が進められている以下の7技術を紹介する。

- ・ 列車通過時の速度計測データからの減衰振動の自動抽出と固有振動数の算定技術
- ・ 動的計測結果をもとにした橋梁の健全性評価のための指標
- ・ ポータブルスマート傾斜計 *tiltoru*
- ・ 橋梁たわみ計測技術 INTEGRAL PLUS
- ・ 構造物変形の計測・監視技術 *DEGRIS*
- ・ 交通振動下における加速度計測に基づく変位推定法
- ・ 地震応答下における加速度計測に基づく変位推定法

【イノベーション技術の名称・タイトル】

列車通過時の速度計測データからの減衰振動の自動抽出と固有振動数の算定技術

【概要】

本技術では、人の手を介さずに、列車通過時の桁の鉛直速度応答波形から、自動で減衰振動波形を抽出して固有振動数を推定する仕組みを構築した。多数の実橋における計測データに対し、本システムを適用し、支間長と固有振動数の関係について整理をした。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

大量に存在する構造物の中から、健全度が低下している構造物を抽出することが求められた。健全性の評価指標として、固有振動数の変化は良く検討されているが、実用化にあたっては、多数の計測データからの固有振動数の算定が必要であり、人の判断を必要としない固有振動数の算定手法が必要となっていた。

計測データには、列車による強制振動部分とその後の減衰振動部分が混在しており、固有振動数の推定において強制振動はノイズとなる。また、振動が大きい場合、可動側支点が移動した際の摩擦により線形で減衰する部分も存在し、これもまたノイズとなる。よって、固有振動数を高精度に算定するためには、純粋に対数減衰をしている振動部分を抽出する必要がある。抽出にあたって人による判断が必要だと多数のデータに対する処理が難しいこと、人の目では摩擦減衰の混在の判定が難しいことなどの問題があり、自動化が求められていた。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

固有振動数推定用波形の抽出を自動化したことで、大量の計測データからの固有振動数算定を用意に算定でき、結果として固有振動数の継続的なモニタリングシステムに活用できる様になった点がイノベティブであろうと考えられる。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

実橋計測データを用いた、構造物の健全度評価に関する内容であり、関連する研究は多数存在するが、数が多く、一部の例示では偏りが出る可能性が高いため省略するが、これらの研究においては、計測データを丁寧に確認しその一環として固有振動数を算定することが多いと考えられる。一方、本技術は大量のデータを処理することに重点を置いており、多数の計測データから固有振動数を算定し統計的に処理することで、構造物の実情を効率的に把握できるものになっている。大量の結果を用いて傾向を見るという方向での検討であり、実用面に重きを置いたものとなっている。逆に言えば、現象を細かく見るのには向いていない。

【技術の内容紹介】

関連論文¹⁾より、処理内容を示した図を引用する(図1)。計測した振動の実効値を算定して dB で表示すると、対数減衰している部分は線形で変化することから判別できるので、対数減衰振動部分($T_0 \sim T_2$)を自動的に判定し抽出することができる。抽出した部分波形に窓関数をかけて端部を平滑化処理した上で離散フーリエ変換してパワースペクトルを求め、これを平滑化した上で固有振動数を推定する。

【技術開発時の話】

実効値の算定には、JIS の振動レベル計で定義されている時定数 0.63 秒のアナログの実効値回路 (RC ローパスフィルタ) をデジタル信号処理で再現したものを用いている。デジタルだけでは困難な処理に、アナログの考え方を適用することで、思いのほかうまくいった内容である。

【技術の限界・今後の課題等】

本来は線形で変化している部分を抽出するのが望ましいが、ほぼ同じ列車しか通らないので似通った応答になるという計測データの特徴から、簡易的な判定手法(-1dB から最低 dB まで)での抽出とした。そのため、これをより一般化し、直線で変化している部分のみを抽出して処理できる様にする必要がある。

自動化しているため、イレギュラーなデータには弱い。そのため、最終的には人の目によりチェックして、異常値を有するデータは無効と判断して除外している。スパイクノイズなどの典型的な異常値については機械的に処理可能な可能性があるため、その実装が必要である。また、最終的には、AI を使用することで、異常データを除外することが可能となる可能性もあるが、今後の課題であろう。

現状では、レーザードップラー (鉄道総合技術研究所の U-ドップラー) のデータに特化したシステムになっており、他の計測データなどの汎用的なものへの展開が必要である。

対数減衰部分を抽出できるので、対数減衰率 (実効値減少部分の傾き) より減衰比も自動で算定できることから、これも同時に算定し、評価指標に追加して評価に用いることができると考えられる。この機能の実装が必要である。

適用対象とした RC 版桁は、軟弱地盤にあると支点となる橋台自体が振動するため、地盤の振動特性の影響が混在することが判明し、算定した固有振動数自体は構造物の健全度評価にはあまり有効ではなかった。支点が強固で支間の長い橋梁の計測データを対象に、固有振動数の変化を長期間確認し、変状との関係を整理することが必要と考えられる。

【技術の情報が得られる文献 (論文等)】

- 1) 伊藤 雄郷, 大野 雄史, 吉田 幸司, 西山 誠治, 田辺 篤史: 複鉄筋版桁鉄道橋の健全度評価のための簡易指標の提案, 構造工学論文集 A, vol. 63A, pp.876-887, 2017.

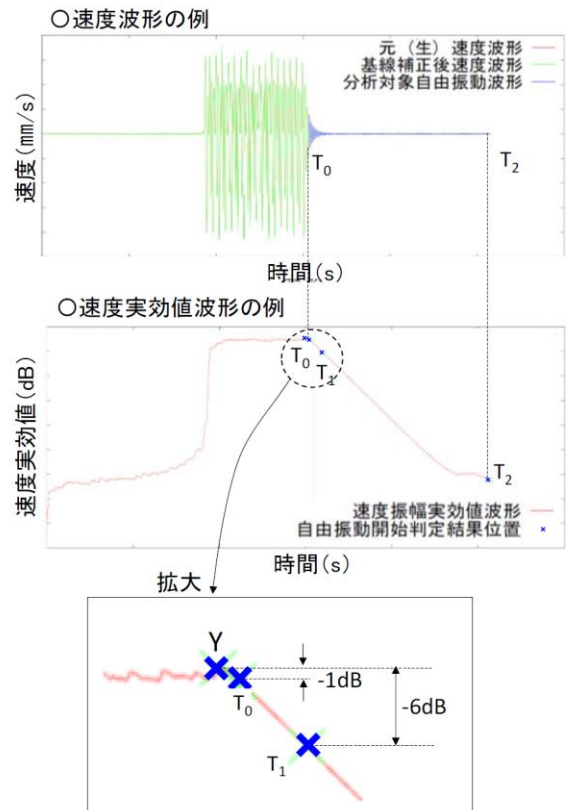


図1 列車通過後の自由振動部の推定¹⁾

【イノベーション技術の名称・タイトル】

動的計測結果をもとにした橋梁の健全性評価のための指標

【概要】

本技術では、列車通過時のたわみ波形を計測し、そのたわみ波形と設計時の活荷重たわみから健全度評価に用いる指標を作成して提案し、有効性について検証するものである。引用論文は RC 桁が対象であるが、支間長が短い桁であれば、鋼橋にも適用が可能である。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

固有振動数による評価は、地盤の影響などが含まれてしまうこと、固有振動数は温度変化や支点移動による軸力の変動の影響を受けることから、絶対的な評価は難しいことが判明したため、別の評価指標が必要とされた。構造物を維持管理していく際に不安を覚えるのは、列車通過時に大きく振動・たわむ橋梁であるので、これを評価指標として用いることが考えられた。

一方、レーザードップラーによる計測では、直接計測されるのは速度波形であり、これを1階積分することでたわみ波形が算定されている。積分処理において、低周波のノイズがあるとこれが大きく増幅されることとなり、フィルタ処理を施したとしても、たわみ波形の基線がゆがむことが多くみられた。基線のゆがみはフィルタによる処理では限界があるので、別の方法が求められた。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

RC 構造物の評価に、鋼橋の疲労の評価に使用されるレインフロー計算を組合せることで、これまでにはなかった動的たわみという観点からの評価を可能とした。また、動的たわみは、範囲として算定されるため、基線のゆがみによる影響を受けにくいこと、列車通過時に複数算出されるのでノイズを含みやすい最大値ではなく、1 列車通過時の中央値を用いた評価も可能であることから、よりロバスト性の高い評価指標とすることができている。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

応力による評価や、たわみによる評価は多くあるものの、たわみの動的な変化量に着目した検討は少ない。

【技術の内容紹介】

応力波形の代わりに、たわみ波形に対してレインフロー処理を行い、たわみ範囲に変換する。たわみ範囲を大きいほうから順に並べ、9番目に大きい値を1列車通過時の動的たわみとして定義する。ここで、9番目は、基線のズレや曲がり、スパイクノイズ等の影響はたわみ範囲の大きいものに含まれやすいことから、最大の応答は無視した上で、1列車通過時のたわみ応答の17あるピークの真ん中（8番目）に対応するものとして選定されている。

動的たわみは橋梁の支間や桁高による影響も受ける。対象となるRC版桁は標準設計されているため、桁高等は支間長に依存する。そこで、動的たわみを支間長で除したものを、「動的たわみ比」として求め、これをもとに健全度の評価を実施することを提案した。

補助的な指標として、動的たわみを設計値による活荷重たわみで除したものを「簡易動的たわみ率」として求める。動的たわみ比との関係を見ることで、動的影響を受けやすい橋梁や劣化の進行が疑われる橋梁を抽出できる可能性がある。

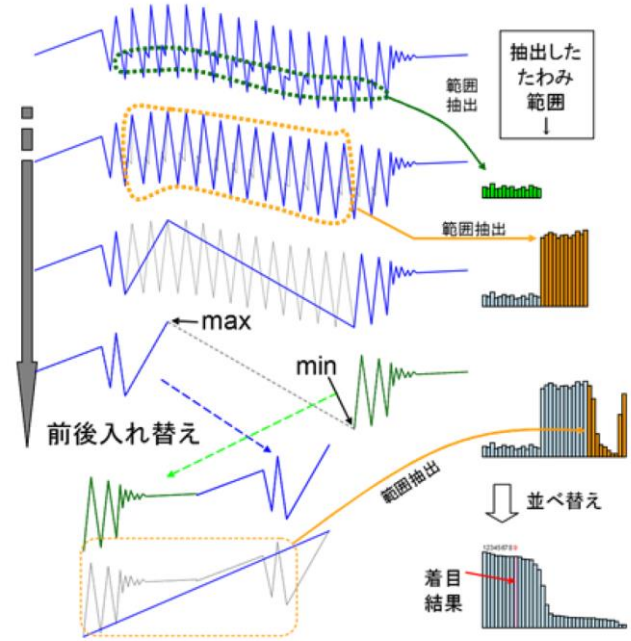
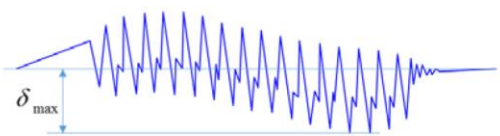
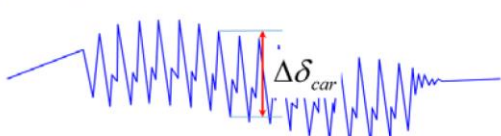


図1 動的たわみの算出¹⁾

表1 たわみ比と動的たわみ比の比較¹⁾

項目	従来なたわみ比 (最大たわみ・支間長比)	動的たわみ比
算出法	$\frac{\delta_{\max}}{L}$ <p>δ_{\max} : 列車通過時の最大たわみ(mm) L : 支間長(m)</p> 	$\frac{\Delta\delta_{car}}{L}$ <p>$\Delta\delta_{car}$: 動的たわみ. 1車輻通過時のたわみ振幅の中央値で、レインフロー法により算出(mm) L : 支間長 (m)</p> 
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・跳ね上がりは含まない. ・低周波成分の影響が大きい. ⇒ 高精度な変位計測が必要. ・衝撃係数を考慮した設計活荷重たわみと直接関連 ⇒ 理解しやすい ・すれ違い等の突発的なイベントやベースラインドリフトの影響を受ける. ・ゼロ点が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・跳ね上りを含む. ・低周波の波形の影響は除外される. ⇒ 加速度計等からの算定が可能. ・設計値とは直接の関連付けは困難. ・算定法上、すれ違いは無視され、ドリフトの影響も小さくなる. ・ゼロ点不要

【技術開発時の話】

固有振動数による健全度評価が困難であるため、別の指標を色々と検討したもの、実橋計測データであるので、動的な効果にも着目して評価することとした。

列車通過時においても、台車が橋梁上に載っていないタイミングが存在するため、桁が跳ね上がるという特徴を何とか活かさないかと考えて作成した評価指標である。

【技術の限界・今後の課題等】

橋梁上に台車が載っていないタイミングが存在することが、動的たわみによる評価ができる理由の一つであるので、支間長が短い橋梁にしか適用できない。

経年変化が不明であるので、再度計測して変化を確認することが必要。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) 伊藤 雄郷, 大野 雄史, 吉田 幸司, 西山 誠治, 田辺 篤史: 複鉄筋版桁鉄道橋の健全度評価のための簡易指標の提案, 構造工学論文集 A, vol. 63A, pp.876-887, 2017.

【イノベーション技術の名称・タイトル】

ポータブルスマート傾斜計 tiltoru

【概要】

本技術は、装置内部の加速度センサによって計測した重力加速度より、対象構造物の傾斜を算出する技術であり、ハンディサイズの簡易な IoT 機器とすることで、日々の巡回点検時の作業性を向上させたものである。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

日本の道路総延長の 84%にあたる 1,029,800km は市町村道であるが、その財源および人材は不足している。常設モニタリングは管理範囲が少ない国・高速道路では予算も潤沢であるため好適であるが、市町村道では管理延長が長く、状態も悪いため、常設モニタリングは不向きである。広範囲に複数発生する計測対象を網羅するため、常設モニタリングの 1 損傷に 1 機器の常識を見直し、1 つの機器を持ち込みモニタリングに利用する手法を開発した。機器をハンディサイズの簡易な IoT 機器とすることで、利用者非依存かつ拘束時間最小で日々の巡回点検時に職員が実施できるようにした。

対象として「傾斜」を選定した理由は、物体の基本的な変形を捉える、万人にわかる値だからである。それまで「変形」の把握技術を開発してきたが、構造物のなかには剛性が高く変形が極めて小さい床版橋や防波堤などが存在する。これらの構造物の普遍性を確認するためには、剛体変形をイメージして把握することが一つの手法と考え、「傾斜」情報の取得を目指した。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

- ・ 常設モニタリングで課題となる機器の温度ドリフトを、持ち込み型とすることで解消した。端末を 180 度回転し、その場で校正することで、温度ドリフトをキャンセルできる。
- ・ 現地で「測る」だけで、IoT 機能によりクラウド転送、データ地図上表示、過去データ比較が自動的にできる。傾斜を測る作業は簡易なデジタル計測であり、作業員非依存のデータを得られる。
- ・ 端末には携帯電話モジュールおよび GNSS モジュールを積んでいない。代わりに QR コードを通じて結果をスマートフォンに送ることで、スマートフォンの高性能な機能を活用している。合わせて、端末の費用高騰を抑制している。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

傾斜計およびそれに類する水準器は以前より存在する。近年では MEMS 技術を活用した小型の傾斜計も散見される。一方で、傾斜計の主な利用目的は FA (Factory Automation) 用であり、特定の温度で高精度化されている場合が多い。本機では、屋外での土木構造物を対象とした利用目的のため、現場で校正ができる機能を実装し、校正から測定までの時間を短くすることで、あらゆる温度環境でも絶対傾斜角を測れるように工夫がされた。

土木分野には常時監視用の傾斜測定器が多数存在する。それらとは、精度および「持ち込み」コンセプトが異なる。

【技術の内容紹介】

本技術は、装置内部の加速度センサにより重力加速度を計測し、傾斜を算出するものである。計測は、以下の手順で行う。

1. ベースプレートの設置（初回のみ）
2. キャリブレーション（端末を 180 度回転し、絶対水平を認識）
3. 端末設置、測定ボタンのタッチ（指を離した後に測定が行われる）
4. 測定結果を専用アプリで撮影
5. クラウドで計測結果を確認



図1 システム概要

【技術開発時の話】

- 角度は基本単位系ではなく、組立単位系である。そのため、標準器がみあたらず、基準となる角度を作ることに苦労した。
- 熊本県玉名市の巡回点検では、2021年6月から8か所で、2名が交代で利用を開始、点検の見える化を実現。2021年台風5号の豪雨時には、状況の変化に応じた持ち込みモニタリングを取り入れ、監視装置と同様の数値変化（変状）を捉えることができた。また、即時に計測箇所を追加できるという利点も確認された。
- 地滑り危険地帯、洗堀が懸念される橋脚、特殊な構造の橋桁など多岐に渡る計測対象に対して、1台の持ち込み型スマート傾斜計で完結し、地方自治体のDXを実現した。

【技術の限界・今後の課題等】

- ベースプレートを使用する場合，繰り返し測定精度を確保するため，計測装置本体のガイドをベースプレートに押し当てて設置する必要がある。
- ベースプレート上に異物があると誤差要因となる。
- 平面精度の低い設置面上では，計測位置が異なると表面の凹凸を計測装置が拾い，誤差要因となる。
- 加速度センサの温度依存性が誤差要因となる（キャリブレーションで補正可能）。
- 鉛直面に対しては，L字金具などで水平面を設置する必要がある（45度程度までの斜面は計測可能）。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) TTES 社 技術紹介ページ <https://ttes.co.jp/service/tiltoru/>
- 2) 国土交通省 点検支援技術性能カタログ 「携帯型高精度傾斜測定装置」
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/pdf/c/BR030035.pdf>

【イノベーション技術の名称・タイトル】

橋梁たわみ計測技術 INTEGRAL PLUS

【概要】

本技術は、単純桁の動的活荷重たわみを簡易に計測するための IoT システムである。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

橋は、河川、海、鉄道、道路など、横断が困難なところに建設される構造物である。橋のたわみは、健全性を示す重要かつ明確な指標であるが、従来手法では橋桁の下や橋を見渡せる遠方からの計測が必要となり、計測機器の設置と撤去には時間を要する河川協議や、高額で危険な足場設置作業を伴う。

人口減少が進み橋梁技術者の不足が進む一方で、管理する老朽化橋梁が増える社会においては、橋梁の健全性を示す指標を簡易に取得できる技術が必要になる。

最小限の労力と費用で中小橋梁を効率的に維持管理する指標を求め、車輛通行荷重により発生するたわみ量、すなわち、変位応答を監視するモニタリング方法を検討した。その際、技術者がいない世界でも興味が沸く指標であること（ミリメートルという親しみのある単位）、常時設置での費用高騰を避けて持ち込み設置（都度設置）とすること、ボタン一つで結果を得られることで誰でも使えることを目標に据えた。

変位応答のモニタリング方法は、当時性能が向上してきた高精度な加速度計を用い、加速度の2階積分により変位を算出した。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

従来技術では橋桁の下や橋を見渡せる遠方から計測が必要で、計測機器の設置と撤去には、河川協議や高額で危険な足場設置作業を伴った。橋梁構造物の変位計測において必要な不動点を支点上とするため、橋梁外部に不動点を必要としないことで、短期・安価・安全に誰もが計測できる画期的な技術となっている。

橋梁の振動（加速度）から2階積分により変位を求める方法は、積分誤差が大きく真値とのズレがおおきくなってしまいう手法として知られていた。2000年ごろから長周期対応の加速度計の製品開発、および時系列波形処理の研究開発により実用化の目処が立った。この研究成果を誰でも実行できる製品として実用化するため、ボタンを押すだけで変位応答が分かるように実用化のための開発を行った。結果として、橋梁諸元を入れる必要はなく、橋梁への車両の進入退出のタイミングを別装置から情報取得する必要もなく、高精度な変位応答の取得を実現した。

機器には加速度計の他、GPS・携帯電話装置を含んでおり、所謂 IoT 化している。取得情報の GIS クラウド連携を実現している。対象橋梁と過去の計測結果を時系列で確認できることから、長期的な維持管理への利用が期待される。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

理論的に可能とされる2回積分による変位算出では、加速度センサ自体が持つ自己ノイズの影響により大きな積分誤差が生じるため、加速度センサの性能および積分処理の工夫が重要となる。特に、車輛通行による変位応答は準静的な半波長応答であり、積分誤差と混在する変位応答を判別・処理することが難しい。

複数の加速度センサを利用し、車輛検知から積分時の条件を与えることで変位応答算出する方法も提案さ

れているが、本検討の主旨として、最小限の計測機器での実現を目標としているため、加速度センサは1個のみを使用して変位応答を算出できる手法を検討することとした。

【技術の内容紹介】

本技術は車両通過時の加速度を計測し、そのデータを2階積分することで変位（桁たわみ）を算出する。ボタンを押すだけで結果を得られるが、以下のように適用の制約条件がある。

- ・ 単純桁であること
- ・ 車両の橋梁上通過時間を5秒以内とすること
- ・ 荷重車の単独走行とすること



図1 機器の使用状況

変位の算出には、加速度波形のみを利用して、通過車両の検出から、時刻歴上での統計値の変化から積分誤差の影響と変位に関わる波形を判別・補正する処理までを全自動で処理する手法を適用した。積分ノイズを推定した上で、それを取り除く手法に切り替えたことで変位への変換処理を全自動化した。

【技術開発時の話】

- ・ 様々なセンサを購入して比較検証を繰り返し、最適なセンサを選定して積分ノイズの影響を低減した。
- ・ データのGPS情報から、データと計測対象橋梁を自動で紐付ける仕組みを実現したことで、同一の機材を持ち運んで橋梁を次々と計測することが可能となった。

【技術の限界・今後の課題等】

以下は本技術の適用対象外であり、今後の課題となっている。

- ・ 橋梁構造が単純桁でない場合（連続桁など）
- ・ 荷重車の橋梁通過を5秒以内に完了できない場合
- ・ 交通量が多い、交通規制ができないなどの理由により、荷重車単独での走行ができない場合

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) 加速度応答を用いた変位応答モニタリングに関する検討，土木学会西部支部沖縄会，第6回技術研究発表会 pp.88-89, 2017.
- 2) 車輛通行に伴う加速度データを用いた橋梁の変位モニタリングに関する検討，土木学会第72回年次学術講演会，I-350 pp.699-700, 2017.
- 3) TTES 社 技術紹介ページ <https://ttes.co.jp/service/integral/>
- 4) TTES 社 技術紹介動画 <https://www.youtube.com/watch?v=BS4gwBiNcYo&t=3s>
- 5) 国土交通省 点検支援カタログ 「たわみ計測による耐荷性チェックシステム」
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/pdf/c/BR030008.pdf>

【イノベーション技術の名称・タイトル】

構造物変形の計測・監視技術 DEGRIS

【概要】

本技術は、重力加速度の変化を基に算出された傾斜角から、連続する構造体の変形図を得る技術である。

【背景、着想に至った経緯（背景）と考えられること】

橋梁の維持管理の重要性が叫ばれている中、近接目視点検の性状評価だけでなく、橋梁の性能を評価できる技術が必要とされている。耐荷力調査において、たわみは重要な指標であり、耐荷力の評価や初期状態の把握の観点からたわみ計測の進歩が期待されている。

近年、センシング技術の進化および計算手法の開発により、加速度の2階積分を活用した活荷重たわみ計測は高精度化を遂げている。しかしながら、加速度計の長周期への対応特性から長大橋梁や渋滞走行などの橋梁への適用は難しい。そこで、加速度センサの重力加速度成分が、長周期の動きにも合わせて変化できる特性に着目した。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

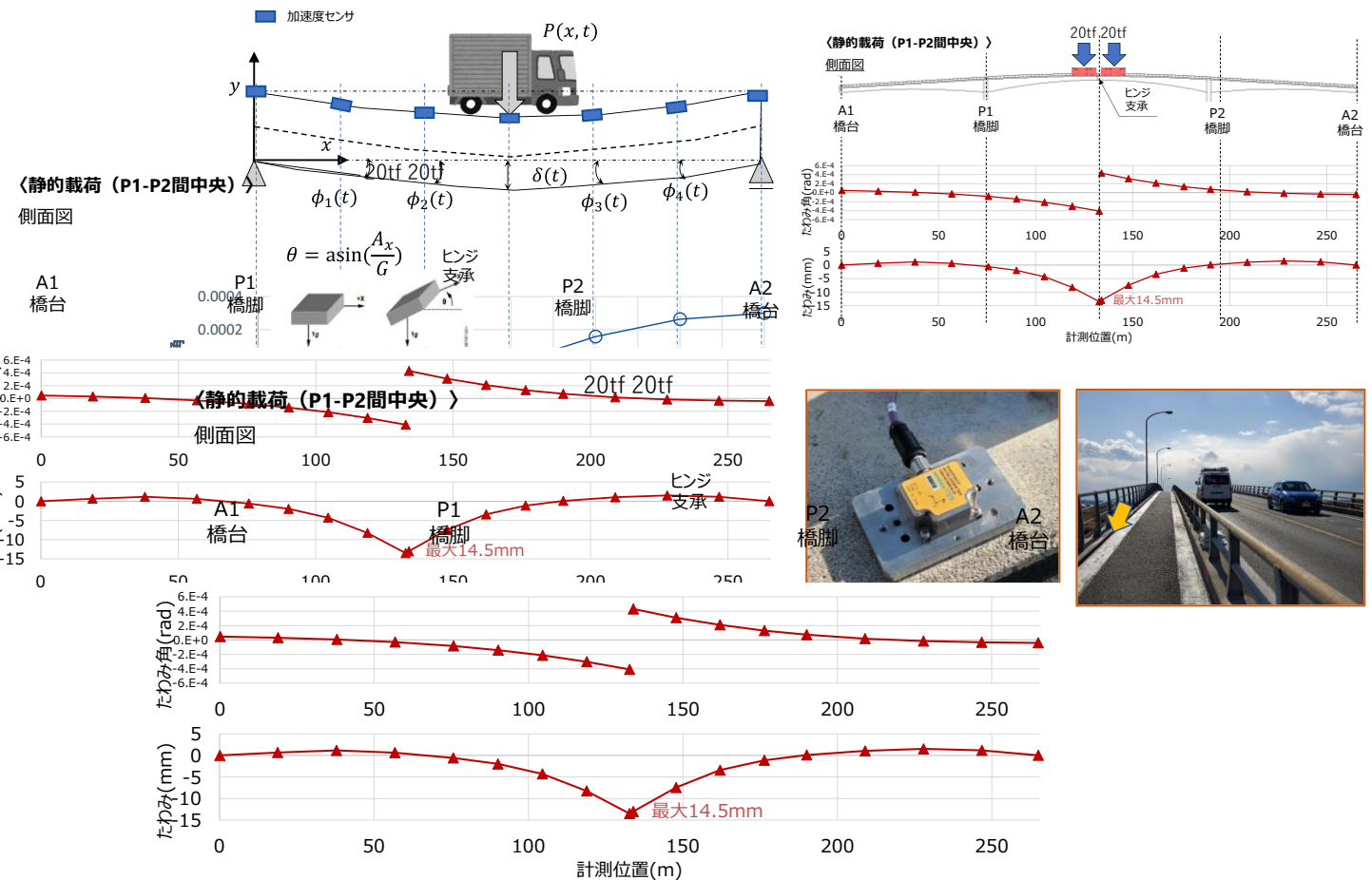
加速度計の重力加速度に着目し、重力加速度の変化を傾斜角に変換することで、加速度計から静的な挙動を捉えた。傾斜計を用いた手法では、数値積分を必要しない。橋軸方向位置と各所のたわみ角の関係式を構築し、関係式を積分することで変形図を得る。静的な挙動を把握する技術として開発をスタートしたが、処理を高速に行うことで連続的な挙動も扱えるまでに至った。取得加速度を周波数で分離し、高周波数帯は2階積分、低周波数帯は傾斜角を用いて変形を算出した後に合成する手法を確立した。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

加速度を利用する変形把握技術として、加速度の2階積分を用いたたわみ計測がある。橋面上からも計測可能であり簡便な手法であるが、動的活荷重でのたわみ変形しか把握できない欠点があり、大型橋梁への適用は困難であった。

【技術の内容紹介】

- 橋梁の変形を測りたい区間に加速度計を5箇所以上設置する。なお、支点部、ヒンジ部、剛性の急激な変化がある箇所では区間を区切るかセンサ数を増やす必要がある。
- 各所の加速度の重力加速度成分を三角関数を用いて傾斜角に変換する。
- 得られた橋軸方向位置と傾斜角の関係を傾斜角関数に変換する。
- 傾斜角関数を積分することで変位図を得る。この際、必要に応じて支点部などをゼロに補正する。



【技術開発時の話】

大型の橋梁にも対応できる技術であるが、当該技術の適用時に他の手法でのリファレンスを取ることができないため精度検証に苦労した。

当初、センサの上に砂袋を載せて固定するなどして試験を行ったが精度が確保できず苦労した。砂袋内の砂の移動や、センサから伸びるケーブルの影響を排除できていないことによる変化が入っていたためであった。現在では、コンクリート面には治具のアンカリングもしくは接着、鋼板には磁石による治具の固定を計測条件としている。

【技術の限界・今後の課題等】

- 取得する傾斜角の領域が極めて小さいこともあり、加速度計の温度ドリフトの影響を受ける。加速度計へのアクティブな温度矯正や、数値処理によるドリフト除去の可能性を探っていく。
- 上記の温度ドリフトの影響のため、現状では長期連続監視への提供が困難である。一方で、時間をおいての活荷重載荷に対する、応答の把握には好適である。
- 道路橋示方書に「たわみ」に関する制限は、使用限界状態に基づく制限値しか存在しない。そのため、維持管理に「たわみ」を利用するのには、各事業者による独自の判断が必要になる。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) 梅川雄太郎，菅沼久忠，木下幸治：複数加速度センサを用いた橋梁のたわみ算出方法の適用性および精度向上に関する検討，土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会，2019.
- 2) 梅川雄太郎，菅沼久忠，木下義昭：傾斜角変化に着目した変形形状計測の適用，土木学会西部支部沖縄会第 10 回技術研究発表会，2021.
- 3) TTES 社 技術紹介ページ <https://ttes.co.jp/service/degris/>

【イノベーション技術の名称・タイトル】

交通振動下における加速度応答計測に基づく変位推定法

【概要】

橋梁の桁たわみは、主として使用性および活荷重評価の観点から把握が重要であるが、参照点が容易に得られないため、接触式変位センサによるたわみの計測は難しい。設置が容易な加速度計を利用して鉛直加速度の数値積分により桁たわみを推定する方法も提案されており、条件が揃えば高精度のたわみ推定が可能である。しかし、積分時間が長い場合には適用性に限界がある。本技術は、橋軸方向加速度の低周波数成分に含まれる傾斜角は桁たわみに感度をもつことを利用して、橋軸方向加速度と鉛直方向加速度を、機械学習により処理することにより変位推定する技術である¹⁾²⁾。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

桁たわみは、参照点が得られない場合には接触式変位センサによる計測が難しく、光学カメラやレーザー、レーダーを利用したたわみ計測も適用性は環境条件に依存し、計測可能なケースが限定的である。一方で、鉛直加速度の数値積分によるたわみ推定は、加速度計さえ設置すればよいため利便性が高い。しかし、積分誤差が過大となりがちであり、特に連続桁や、交通量の多い橋梁では積分時間が長く、たわみ推定が難しい。加速度計を利用しながらも長周期のたわみ成分も捉えられる推定法が期待された。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

桁たわみの動的成分や数秒程度までの周期をもつ成分は、鉛直加速度の数値積分により推定できる。しかし、より長い周期の桁たわみ成分は鉛直加速度のみから推定することは難しい。一方で、橋軸方向加速度には傾斜成分と橋軸方向の振動成分が重畳されており、橋軸方向の振動成分が十分に小さい場合や、傾斜成分と振動成分の周波数帯域が離れている場合には、橋軸方向加速度と鉛直方向加速度を、カルマンフィルタの観測量として一体的に扱うことにより、変位推定できる。しかし、橋軸方向の振動成分と傾斜成分の分離が難しい場合は、カルマンフィルタにより推定する桁たわみ推定値は精度が低い。

桁たわみは、鉛直加速度および橋軸方向加速度に対して感度を持つことは明らかなものの、感度の値を解析的に求めることができず、また、橋軸方向振動成分のように桁たわみとは関係なくノイズと考えられる成分が含まれることから、機械学習を利用して鉛直加速度・橋軸方向加速度と、桁たわみの関係を求め、桁たわみを推定する技術を開発したところに独自性がある。機械学習においては教師データを用意することが重要であるが、本技術では教師データとして桁たわみの正解値を作成する際にも接触式変位センサ等は利用せず、鉛直加速度の数値積分のみを利用しているところにも特徴がある。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

鉛直加速度の数値積分により桁たわみを推定するアルゴリズムはこれまでもいくつかの研究事例がある。また、静的な桁変形を桁に沿って設置した傾斜計の出力を利用して逆推定することも試みられてきた。本技術は、両者の原理を利用して、それを組み合わせるために機械学習を利用しているといえる。

【技術の内容紹介】

鉛直加速度の数値積分により積分時間が 10 秒程度までであれば正確な鉛直たわみ推定が可能である。そこで長期に渡り加速度計測を行ったデータから、車両通過時間が 10 秒未満の時間帯を抽出し、数値積分により、たわみの教師データ（出力）を得る（図 1）。積分時間が 10 秒以上となる時間帯の数値積分は不正確であるため教師データには採用しない。機械学習の入力は鉛直加速度および桁端部で計測した橋軸方向加速度であり、出力は桁たわみである。橋軸方向加速度には傾斜角成分が含まれ、たわみに感度を持つ。

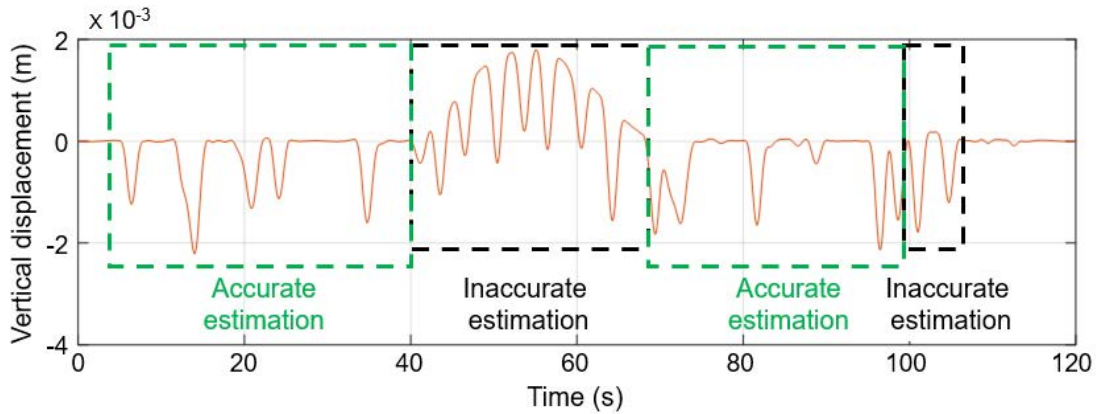


図 1 鉛直方向加速度の数値積分¹⁾²⁾

表 1 橋軸方向加速度と鉛直方向加速度を利用した桁たわみ推定²⁾

	単一車両の通過および車両通過時間 10 秒以下のケース（学習）	車両通過時間 10 秒以上のケース（推論）
入力		
出力	<p>鉛直方向加速度の数値積分</p>	<p>推論（桁たわみ）</p> <p>（入力と出力の関係は、教師データと同じと考えられる）</p>

※入力：たわみに感度を持つ橋軸方向加速度と鉛直加速度，出力：桁たわみ

次に、車両通過時間が 10 秒以上のケースについて学習結果を適用して推論する（表 1）。図 2 に示す通り数値積分の場合は積分時間が長い場合には不正確となるが、機械学習の場合には正確なたわみ推定値が得られる。

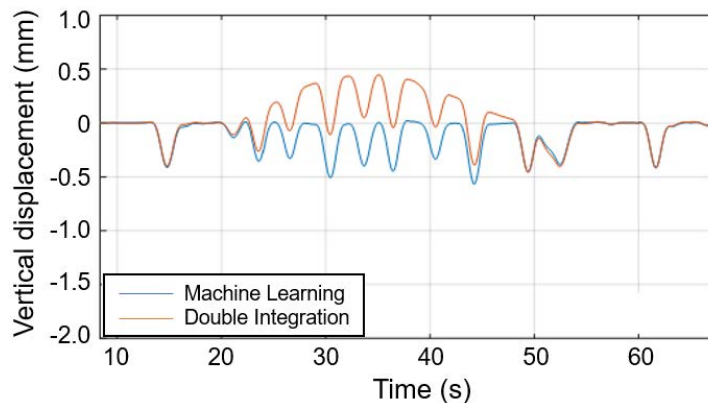


図 2 機械学習によるたわみ推定結果²⁾

【技術開発時の話】

機械学習は利用せずに、鉛直加速度と橋軸方向加速度をカルマンフィルタにより統合的に処理することを当初検討していたが、橋軸方向振動成分と傾斜成分の分離が難しく断念した。機械学習を適用することにより課題が解決した。

【技術の限界・今後の課題等】

鉛直加速度の数値積分により教師データを作成する必要があることから、積分時間が 10 秒以下程度のデータを多数作る必要がある。長大橋に本手法をそのまま適用することは難しい恐れがある。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) Atta E Mustafa, Tomonori Nagayama, Takaya Kawakatsu, Atsuhiko Takasu, Osamu Sanada, Hisatada Suganuma: Deflection Estimation of Highway Bridges Based on Acceleration Measurement Using a Machine Learning Approach, 8th World Conference on Structural Control and Monitoring (WCSCM), 2022.
- 2) Atta E Mustafa: Bridge deflection estimation using a machine learning approach and its application to vehicle axle weight estimation, 東京大学博士論文, 2022.

【イノベーション技術の名称・タイトル】

地震応答下における加速度応答計測に基づく変位推定法

【概要】

地震動を受けた構造物の被災度を評価する際に変位応答履歴が分かれば有用である。通常の地震応答解析では、構造物の数値モデルに、地震動を入力し変位応答を計算するものの、モデル化誤差の影響を受けるため非線形領域の変位まで推定することは難しい。本技術は、地震動および応答加速度を計測し、データ同化手法により構造物の数値モデルと併せて解析することにより、モデル化誤差や計測誤差の影響を軽減して、残留変位成分を含む地震応答変位を推定するものである¹⁾²⁾。

【背景、着想に至った経緯（背景）と考えられること】

所定の計測震度を超える地震動が観測されると、橋梁など構造物の目視点検が行われるものの、安全確認には時間を要する。被害が生じていない場合に迅速に供用を開始するため、加速度応答等の観測を利用して構造物の被災度評価を迅速に行うことが期待される。建築物では建物の地震加速度応答を計測し、線形範囲内ではあるものの層間変位量を推定し、迅速な被災度評価に利用する例もある。被害を生じる非線形範囲も含めて橋梁の変位応答を推定し、迅速に被災度評価を行うことが期待される。近年のIoT技術の進展により地震加速度応答を得られやすくなったことも背景として挙げられる。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

従来の地震応答解析は、地震動を数値モデルに入力し順解析するものであり、入力や数値モデルに含まれる誤差の影響を直接受ける。非線形域のモデル化は特に事前検証が難しく、実構造物の非線形変位応答まで正確に順解析により求めることは難しい。そこでデータ同化手法であるカルマンフィルタを利用して、数値モデルの誤差を、観測された加速度応答により補正しながら変位を推定するところに特徴がある。また、カルマンフィルタ等のデータ同化手法では数値モデルとして、マルコフ性を有する、つまり、履歴の影響を受けない、状態空間モデルが採用されるが、一般の非線形履歴特性モデルは状態空間モデルでは表現が難しい。そこで、一般の非線形履歴特性を有する有限要素モデルを構築し、様々な入力地震動に対する応答を予め計算し、データ駆動型の方法により状態空間モデルを同定してデータ同化に用いる手法を開発しているところにも独自性がある。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

カルマンフィルタを利用した地震応答推定の研究は報告されているものの、非線形域を含む変位推定の問題への適用性を扱うものはない。データ同化やデータ駆動型の状態空間モデル推定を、地震後の被災度評価という工学的目的に援用可能か検討する独自の取り組みである。地震応答を観測に基づいてベイズ推定等の手法により主に線形域の数値モデルパラメータやデータ同化のパラメータを推定する研究はなされているが、本技術はパラメータ推定と、データ同化による変位状態量推定を組み合わせる手法といえる。

また、近年は順解析モデルが高度化して構造物の応答の詳細まで表現できるようになったものの、多数のモデルパラメータ同定は難しい。そこで、詳細な有限要素モデルによる非線形応答解析をあたかも実構造物の観測として扱い、逆解析アルゴリズムの検証を行っているという点でも近年のモニタリング・逆解析技

術の研究開発動向を反映しているといえる。

【技術の内容紹介】

橋脚を対象に、変位応答推定のアルゴリズムを検討した。まず、対象構造物を簡単な状態空間モデルとして表現する。1自由度非線形履歴特性モデルにより橋脚を表現し、トリリニアモデルを採用した。トリリニアモデルのパラメータは遺伝的アルゴリズムやMCMC法等を利用して最適化する。地動加速度と応答加速度を観測し、非線形カルマンフィルタにより変位を推定するものである(図1)¹⁾。対象橋脚のモデルを図2に示す。シェル要素に非線形移動硬化則を設定している。鷹取波を入力した際の変位応答等とその推定値を図3に示すが、残留変位成分を含めて推定できている。

構造物が複雑になった場合には、データ同化を適用しても1自由度トリリニアモデルとして再現することが難しい。そこで、図2の有限要素モデルに対して、データ駆動型の状態空間モデル推定を適用しモデル化した。状態方程式の基底関数として多項式を採用し、その係数を有限要素モデルの応答データから同定するものである²⁾。データ駆動型の状態方程式モデルの推定は既に提案されているが³⁾、これをデータ同化の枠組みで利用するものである。図4に示すように履歴特性や変位応答を正確に推定できる。

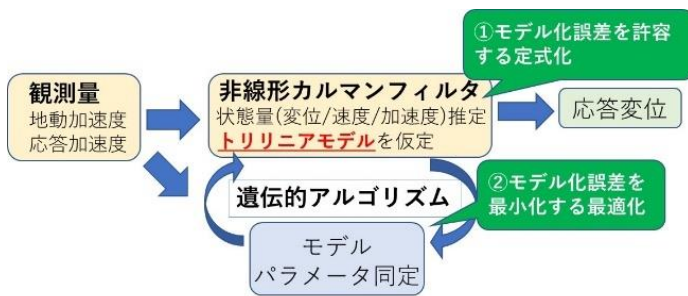


図1 非線形カルマンフィルタとパラメータ推定を組み合わせた変位推定手法¹⁾

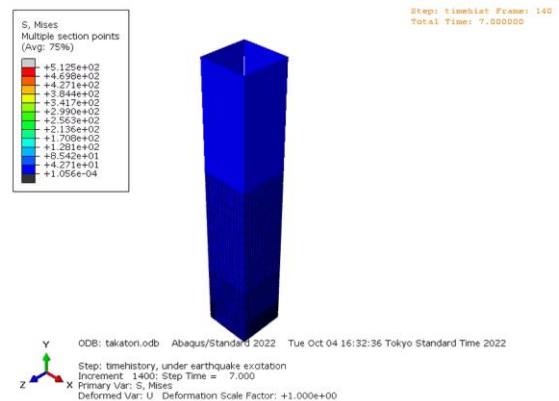


図2 橋脚の非線形有限要素モデル

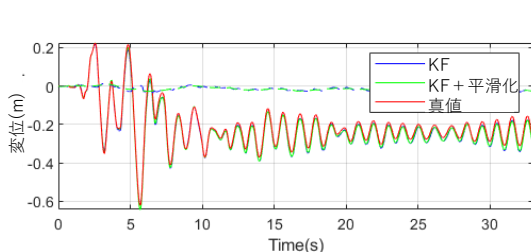


図3 変位応答推定

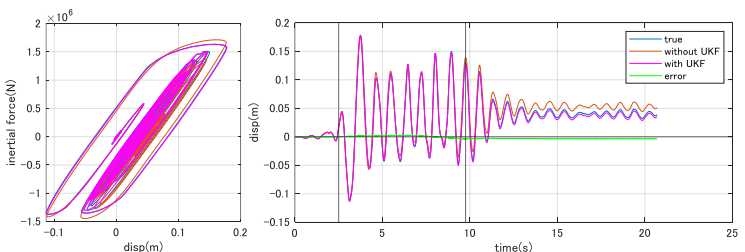


図4 データ駆動型の状態空間モデル推定と非線形カルマンフィルタを利用した変位推定結果²⁾

【技術開発時の話】

データ同化技術は、モデル化誤差や観測誤差の分布について適切に見積もることが必要で、推定結果はその設定に大きく依存する。モデル化誤差や観測誤差の推定方法に関する知見の蓄積により実現した。

【技術の限界・今後の課題等】

長大橋の全体挙動や曲線橋など応答が複雑な構造物に対する適用性を明らかにする必要がある。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) 石原佳奈, 楊曜華, 長山智則, 中村俊敬, 蘇迪: 加速度応答計測と非線形履歴特性モデルに基づく変位応答推定, 構造工学論文集 A, Vol.68A, pp.275-288,2022.
- 2) 垣内優希, 楊曜華, 北原優, 長山智則: データ駆動型状態空間モデル同定とカルマンフィルタを用いた地震応答変位推定, 土木学会全国大会第 78 回年次学術講演会, 2023.
- 3) Z. Lai, S. Nagarajaiah: Sparse structural system identification method for nonlinear dynamic systems with hysteresis/inelastic behavior, Mechanical Systems and Signal Processing, 2018.

2.3 電源・発電に関する技術（カテゴリー③）

近年、通信技術の発展により、無線センサネットワークシステムの活用事例が増えている。従来の有線式に比べ、データを遠隔地にて受信できるため、現場に赴く必要がないこと、配線および養生が不要となり、現場作業で生じる負担が軽減できることなど、多くの利点がある。とりわけ、データの遠隔通信は、財源および人員が不足する道路管理者にとっては、今後の維持管理を行っていくうえでの重要な技術となり得る。一方で、センサシステムを起動するには、一般的に電池やバッテリーが使用され、定期的な交換が伴う。この場合、交換に伴う労力、近接手段の費用が発生し、従来の有線式に比べて割高になる可能性がある。つまり、無線センサネットワークシステムを効果的に運用するためには、安定した継続的な電源の確保が課題となる。

ここでは、電源および発電に関する技術開発が進められている以下の3技術を紹介する。

- ・ 圧電素子を利用した鉄道橋での振動発電
- ・ 橋梁振動を利用した環境振動発電
- ・ 構造物の温度差エネルギーを利用した温度差発電

【イノベーション技術の名称・タイトル】

圧電素子を利用した鉄道橋での振動発電

【概要】

橋梁のモニタリングに要する電力を、鋼鉄道橋の部材振動から発電する技術である。発電デバイスとして圧電素子を利用しているが、小型かつ安価であることに特徴がある。発電量は少ないものの、幾つかの工夫により振動発電による電力のみで、無線通信や、列車通過のない（振動発電のできない）夜間の計測、また動的な計測などを可能としている。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

従来より、モニタリングについては電源確保がしばしば問題となっていた。特に、当該技術の開発当時は、小型のセンサデバイスが相互に通信してセンシング結果を一か所に集約する無線センサネットワークの適用に期待が高まっていたが、一般に電源として電池を使用しており、電池交換に労力やコストを要していた。一方で、鋼鉄道橋は特に開床式構造において列車荷重が鋼部材に直接作用するため、列車通過時に鋼部材が大きく振動を生じるといった特性があるため、前記の電源の課題に対し、環境発電としての振動発電が有効に利用できるという点に着想を得ている。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

[発電について]

振動発電は、その発電効率を高めるために、振動物の振動に対して共振を利用することが多い。しかしながら、橋梁部材の振動を利用する場合、共振を利用するためには橋梁部材の固有振動数等を予め把握しておく必要があること、また、列車通過時の橋梁部材の振動は固有振動数から少なからずシフトしていること等から、必ずしも共振を利用しやすい条件ではない。当該技術で利用した圧電素子であれば、部材に貼り付けるだけで橋梁部材のあらゆる振動から発電が可能となり、予め固有振動数を把握する必要もなく、かつ共振を利用するメカニカルな機構も不要である点が特徴である。

[無線通信について]

センサネットワークを利用する場合、無線通信では主にデータを送信する際の電力と、他のセンサノードからデータを受信するための待機電力が必要となる。これに対し当該技術では、発電量が少ない圧電素子による振動発電を用いるにあたって、センサノード間での通信をせずに、発電時に橋梁上に必ずいる列車に対してデータを送信し、列車がデータを受信し持ち帰るというアイデアにより、データ送信と待機に要する電力を大幅に削減している点に独自性を見出せる。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

環境発電としては、太陽光発電、風力発電、温度差発電などがあり、いずれもモニタリングの電源として活用され、また、研究開発が進められている。これらはいずれも気象現象に依存する部分が多いが、橋梁部材の振動を利用した発電は、気象といった外乱に影響を受けず、期待した発電量を常に得られる利点がある。ただし、太陽光発電や風力発電と比べて、発電量は大幅に少ない。

振動発電については、発電デバイスとしてコイルと磁石による電磁誘導を活用したものが発電量が多く、

発電デバイスとしては最も利用されている。ただし、橋梁部材の振動から磁石を動かすためのメカニカルな機構が必要になるうえ、一般には共振も利用しており、前述のように橋梁部材での発電には不向きな点もある。一方で、圧電素子は簡単に発電が可能であるが、発電量は非常に少ない。

【技術の内容紹介】

本技術の概要を図 1 に示す。橋梁部材の振動から圧電素子を用いて発電し、その電力によりセンシング、無線通信を行う。送信されたデータは、橋上にある列車に持ち込んだ受信機によって受信され、遠隔地の事務所まで運ばれる。本技術は実橋梁で検証がされている（図 2）。発電に適した部材についても、実橋梁で試験がなされており、圧電素子に生じるひずみが小さくてもより高周波で振動する部材、すなわち腹板での発電が望ましいことを示している。また、無線通信には特定小電力無線が使われているが、走行している列車内でもデータを受信できることも検証している。なお、図 2 で検証したシステムは、列車が通過した際に [発電] → [センシング] → [無線通信] が一連で行われるが、別のシステムとして、発電した電力をコンデンサに蓄電し、夜間の列車が通過しない時間帯におけるセンシングを可能としたシステム、さらに動的な測定を数秒間可能としたシステムについても実橋梁で検証がなされている。

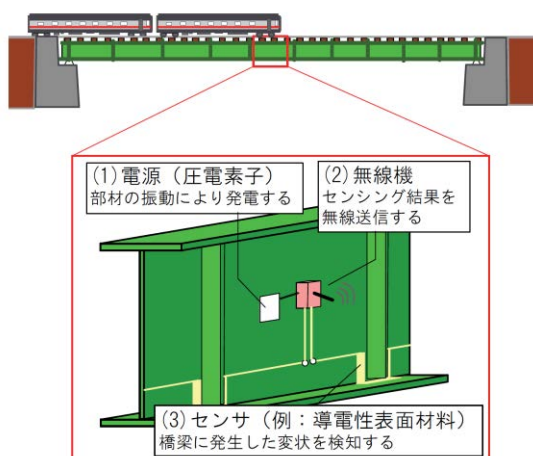


図 1 振動発電によるモニタリングシステム¹⁾

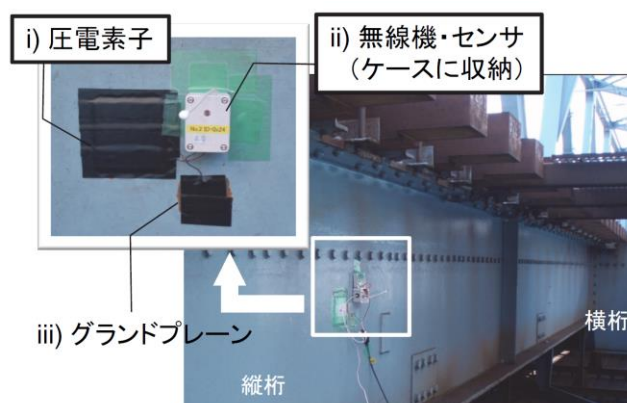


図 2 実橋梁での検証試験¹⁾

【技術開発時の話】

実績のない発電システムであったため全てが手探りであった一方で、必要な回路等は非常にシンプルであるため、圧電素子や電子パーツを諸々と揃え、幾つもの試作機を手作りしながら開発した。

【技術の限界・今後の課題等】

通過列車の速度が低い区間に架設された橋梁や、道床式の橋梁など、部材が殆ど振動しないような橋梁では適用ができない。また、圧電素子自体は耐久性があり半永久的に発電ができるものの、橋梁部材への設置を接着剤により行うため、接着剤の耐久性を確保する必要がある。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) 吉田善紀, 小林裕介, 内村太郎: 鋼鉄道橋の振動発電を利用したモニタリングシステムの開発, 土木学会論文集 A1, Vol.70, No.2, pp.282-294, 2014.
- 2) 吉田善紀, 小林裕介, 和田一範: 鋼鉄道橋の振動発電を利用した充電手法の動態観測モニタリングへの適用, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.532-543, 2015.

【イノベーション技術の名称・タイトル】

橋梁振動を利用した環境振動発電

【概要】

本技術は橋梁など構造物の振動を利用して発電する技術である。インフラ構造物のモニタリングなどを目的としたセンサやIoT機器は持続的な電源確保が課題であり、構造物の振動エネルギーを吸収して電気エネルギーに変換する環境振動発電はエネルギーの自給自足が期待できる。また、制振装置として実用されている同調質量ダンパー（TMD）の機構を適用することで振動発電装置の大型化が可能であり、目的に合わせた発電量の強化や構造物の振動制御が行える。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

センサ等を用いて劣化・損傷などを検知する構造モニタリングにおいて、長期的な電源確保が課題の一つとしてあげられている。その解決方法として注目されているのが太陽光発電をはじめとする環境発電（Energy Harvesting）である。太陽光発電はセンサへの電源供給としてすでに利用されているが、日射がある場所と時間帯でないと発電できないため、橋梁では適用範囲が限られるなどの課題もある。一方、橋梁は交通や風等によって振動しており、橋梁の質量を考えるとその振動エネルギーから発電できる可能性があると考えた。しかしながら、橋梁の固有振動数は一般に数 Hz 程度であり、環境振動発電の主な対象であった機械振動に比べると振動速度が小さくエネルギー密度が低いため発電が困難であった。そこで、橋梁の低周波音対策等のために用いられる同調質量ダンパー（Tuned Mass Damper: TMD）に着目し、TMD のダンパーを発電機で置き換えて吸収する振動エネルギーから発電する方法を考えるに至った。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

粘性ダンパーを発電機に置き換えるには、発電による高い減衰力が求められる。そこで、様々な発電形式の中から電磁誘導方式を採用し、発電機内部の磁界ロスの原因となるエアギャップを 0.2mm まで削減した高効率なリニア駆動型の発電機を応用した点が特徴的である。交通に起因する橋梁の非定常な振動から効率的に発電するため、数値シミュレーションを用いて振動数変化にロバストとなるチューニング方法を提案した点に独自性があるといえる。発電に特化したチューニングのほかに、TMD が本来持っている振動制御効果にも注目し、発電と制振のバランスを考えたチューニング方法についても独自に検討を行っており、用途に合わせた様々な展開が期待できる。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

TMD を振動発電に応用した同調質量系の発電デバイスに関して、Tang and Zuo[1]は単質点と二質点の同調質量系発電デバイスのモデリングを行い、同調質量系発電デバイスや橋梁に調和外力を与える条件下では、発電電力および振動数変化に対するロバスト性の観点より二質点系が有利と結論付けている。振動発電用の発電機としては、電磁誘導[2]や圧電素子[3]、エレクトレット[4]を用いたものなど様々な発電機が開発されている。その中でも電磁誘導タイプは発電電力が比較的高く発電による減衰力が大きいいため、橋梁の低周波数の振動でも必要な減衰力が得られると考えられる[5]。これまでも振動による発電を利用した発電デバイスは開発されているが[6]~ [9]、橋梁に適用された事例は少なく、一般的な橋梁に発生する 0.1~1mm オー

ダーの振動振幅に対して $\mu\text{W}\sim\text{mW}$ レベルの発電電力であった。

-
- [1] Tang, X. and Zuo, L. : Enhanced vibration energy harvesting using dual-mass systems, Journal of Sound and Vibration, Vol. 330, pp. 5199-5209, 2011.
 - [2] Zhu, S., Shen, W. and Xu, Y. : Linear electromagnetic devices for vibration damping and energy harvesting: Modeling and testing, Engineering Structures, Vol. 34, pp. 198-212, 2012.
 - [3] Arroyo, E., Badel, A., Formosa, F., Wu, Y. and Qiu, J. : Comparison of electromagnetic and piezoelectric vibration energy harvesters: Model and experiments, Sensors and Actuators, Vol. 183A, pp. 148-156, 2012.
 - [4] Suzuki, Y., Miki, D., Edamoto, M. and Honzumi, M. : A MEMS electret generator with electrostatic levitation for vibration-driven energy-harvesting applications, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 20, No. 10, 2010.
 - [5] 赤澤輝行, 村尾景司, 岡田幸弘 : フリーピストンスターリングエンジン用リニア発電機の研究, 日本機械学会 [No.05-39], 第9回スターリングサイクルシンポジウム講演論文集, pp.33-34, 2005.
 - [6] Faisal, A. R. M., Hong, C. and Chung, G. : Multi-frequency electromagnetic energy harvester using a magnetic spring cantilever, Sensors and Actuators A, Vol. 182, pp. 106-113, 2012.
 - [7] 吉田善紀, 小林裕介, 和田一範 : 鋼鉄道橋の振動発電を利用した充電手法の動態観測モニタリングへの適用, 構造工学論文集 A, Vol.61A, pp.532-543, 2015.
 - [8] Cassidy, I. L., Scruggs, J. T., Behrens, S. and Gavin, H. P. : Design and experimental characterization of an electromechanical transducer for large-scale vibratory energy harvesting applications, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 22, No. 17, pp. 2009-2024, 2011.
 - [9] Shen, W., Zhu, S. and Xu, Y. : An experimental study on self-powered vibration control and monitoring system using electromagnetic TMD and wireless sensors, Sensors and Actuators A, Vol. 180, pp. 166-176, 2012.

【技術の内容紹介】

プロトタイプとして開発した同調質量型振動発電デバイス (Tuned Mass Generator: TMG) の外観を図1に示す³⁾。振動制御用の TMD では一般的に単質点系が用いられるが, 数式モデルと数値シミュレーションによる検討の結果, 本デバイスは振動振幅をより増幅して発電に有利となる 2 質点形式を採用している⁴⁾。対象とした橋梁の概略図および橋の振動計測から求めた振動モード形状を図2に示す³⁾。TMG の設置位置は振動モードの腹となる位置に設置することとした。この振動モード形状から設置位置における橋の等価質量を算出し, 橋梁と TMG を質点で置き換えた振動系モデルを作成した。図3に示す振動系モデルでは, ばね定数 K のばねと減衰係数 C_M のダンパーで支持された橋梁の等価質量 M があり, 橋梁の等価質量には, ばね, 電磁誘導式発電装置および2つの質量である主マス m_1 と副マス m_2 で構成された TMG が付加されている²⁾³⁾⁴⁾。質量 M に外力 $F(t)$ が作用した時, 質量 M の変位を $X(t)$, 発電デバイスの質量 m_1 と m_2 の変位を $x_1(t)$, $x_2(t)$ とする。2つの質量 m_1 と m_2 の間に発電装置が設置されている。チューニング対象のパラメータは TMG のばね定数に関連する振動数 f_1, f_2 と発電減衰力に関する減衰係数 c_e である。そのほかのパラメータは特性評価計測によって実験的に同定した値を用いている。これら3つのパラメータを変化させ, 図4に示す解析フローの繰り返し計算によって発電エネルギーの増大に着目したパラメータの設計値 f_1^*, f_2^*, c_e^* を決定した。設計したパラメータを表1に示す³⁾。

対象橋梁の大型車交通で励起される振動に対し、発電電力が最大となるように固有振動数 6.1Hz を対象に設計した TMG を橋梁の中央縦桁に設置して 24 時間の発電実験を行った。計測した TMG の発電電圧から算出した発電エネルギーの推移と大型車交通量を図 5 に示す。青色のグラフは、1 時間毎の発電エネルギーの推移を示しており、棒グラフは橋梁から 1.2km 地点のトラフィックカウンターで計測した 1 時間毎の大型車交通量である。大型車通過時には瞬間最大で約 0.5~3W の発電電力であり、橋梁振動が励起されていない時間を含めた平均の発電電力は 2.9mW であった。

TMG による振動エネルギーの吸収効率について検討するため、実証実験の中で得られた 24 時間のデータの一部を切り出し、橋梁と TMG のエネルギーの推移を算出した。図 6(上)にある 30 秒間の橋梁の加速度波形、図 6(下)にその時間での橋梁と TMG のエネルギー推移を算出したものを示す。この時の最大発電電力は 3.2W であり、構造物を対象とした既往の数 μ ~mW レベルの環境振動発電に比べて数オーダー大きな発電電力であることがわかる。交通荷重が橋梁と TMG からなる振動システムに与えた合計エネルギーは 143J で、大部分は橋梁の構造減衰によって吸収されるが、TMG はエネルギー全体のうち 2.3%に相当する 3.3J を電気エネルギーとして発電している。

本技術は大型車交通で励起される振動を対象としており、大型車交通量が平日の 1 日に約 6000 台通過する橋梁を対象としたが、大型車交通量が多い橋梁（例えば首都高速道路は 1 オーダー大型車交通量が多い）を対象とした場合は発電エネルギーが大きくなると考えられる。

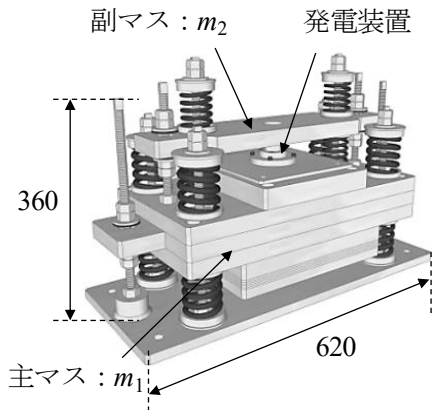


図1 二質点系振動発電デバイスの外観²⁾

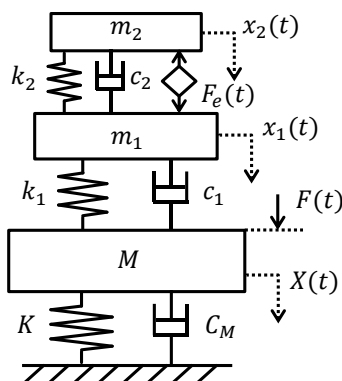


図3 二質点系振動発電デバイスと橋梁の質点振動モデル²⁾

表1 設計した二質点系振動発電デバイスのパラメータ²⁾

副マス質量	m_2	31kg
主マス質量	m_1	104kg
副マス固有振動数	f_2^*	10.2Hz
主マス固有振動数	f_1^*	6.92Hz
副マスばねの減衰係数	c_2	118.0Ns/m
主マスばねの減衰係数	c_1	82.5Ns/m
発電装置の減衰係数	c_e^*	1972Ns/m
進相コンデンサ静電容量	C	1200 μ F

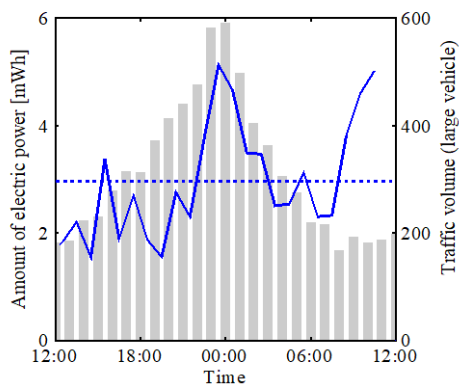


図5 発電量(折線)と時間交通量(棒グラフ)²⁾

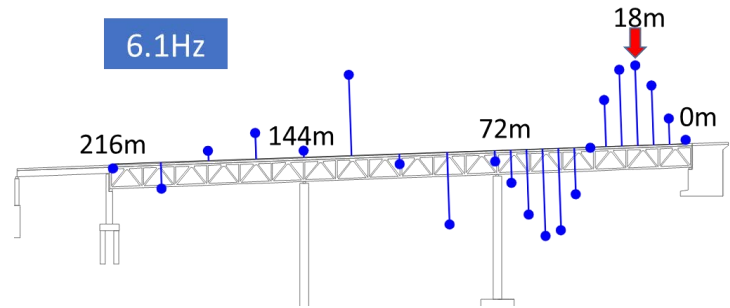


図2 対象橋梁の振動モードおよび設置位置の検討

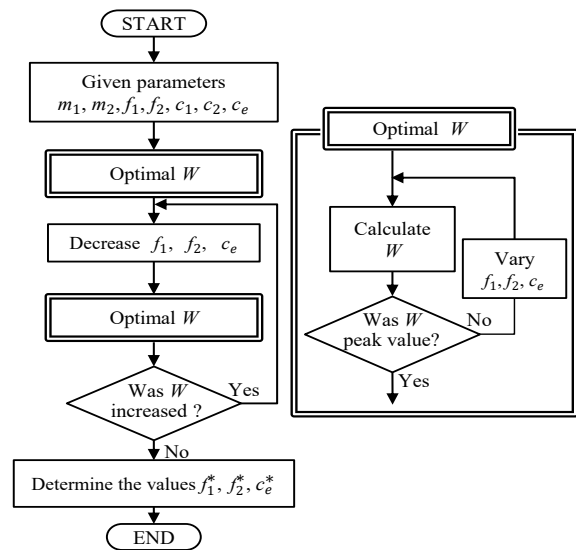


図4 数値シミュレーションによる二質点系振動発電デバイスのパラメータの設計フロー²⁾

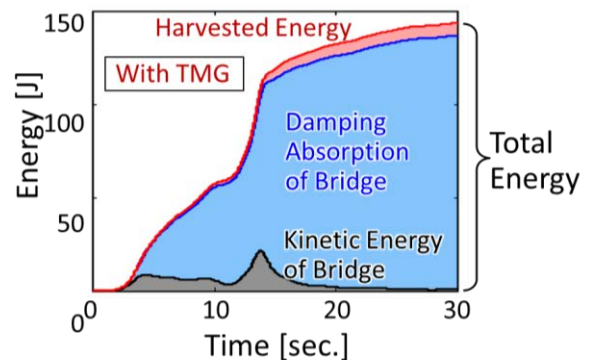
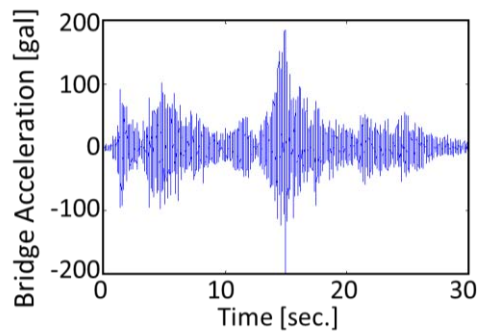


図6 橋梁加速度(上)と振動系のエネルギー収支(下)

【技術開発時の話】

高速道路等の橋梁に関わる問題として、橋梁振動に伴う低周波音の発生が長きにわたり議論されてきた。橋梁振動が家屋の振動などを生じさせ、周辺住民の悩みの種となっていた。その問題に対して、低周波音の原因究明や対策が研究され始め、対策のひとつとして、橋梁に Tuned Mass Damper（以下、TMD）を複数設置する方法が検討されていた。橋梁の振動エネルギーを TMD のオイルダンパーを用いて吸収し、振動を低減しようとするものが一般的であったと考えられるが、TMD による振動制御が幾つかの橋梁で試みられていた。オイルダンパーにはメンテナンスの面での課題もあり、また、一方で、橋梁の特性変動への対応のため、フレキシブルなダンパー性能、あるいは、ロバスト性の高いダンパー性能が求められていたと考えられる。TMD の各マスの動きを把握しつつ、適宜自律的に高効率なチューニングができないかというイメージを描き、スマートなダンパーの実現を目指す流れとなっていく。その中で、TMD の各マスの動きや橋梁の動きを把握するためのセンサを稼働するとともに、自律的なチューニングについて検討できるよう、ダンパーをオイルダンパーから電磁ダンパーに変えることを、様々な分野の専門家からなる共同研究のなかで異分野融合として考えることとなった。

研究を進める中で、電磁ダンパーを開発する方向²⁾と、環境発電として振動発電を行う方向での議論の流れとなった。振動発電のほうでは、最初は、ダンパーはオイルダンパーのままで、TMD の各マスの上下運動を回転運動に変換して、エンコーダーのような形で電気エネルギーへつなぐことなども考えたが、あまり効率がよくなく、やはりオイルダンパーを電磁ダンパーに変えた形、同調質量系振動発電デバイスがよいのではないかの考えから、その方向で研究に入ることとなった。振動発電目的のデバイスの開発に注力しつつ、制振目的でのチューニングも視野に入れながら研究を進め、橋梁振動を利用した発電技術として、一定の成果を得るに至っている²⁾³⁾⁴⁾。さらに同調質量系振動発電デバイスの考え方をベースに、制振技術としての応用にも展開できることが示された¹⁾。

【技術の限界・今後の課題等】

発電対象としている車両通行時の振動では瞬間電力でワットオーダーの発電を達成できているが、交通の空白時間の長さによって時間平均の発電量は小さくなるため、ほかの環境発電と同様に電力供給の安定化が課題といえる。例えば複数の環境発電を組み合わせるのが解決方法の1つとして挙げられる。この他重要な課題としては、発電コストが挙げられる。高い発電減衰力を得るために高性能なりニア発電機を開発しているが、高価なネオジム磁石を用いていることや加工に高い精度が求められるため製造コストが高い。一方で、同調質量形式は大型化が比較的容易であるため、大型化することで発電コストを下げるのが可能といえる。振動制御と発電を両立させることや、発電波形を用いた交通・構造モニタリングなど振動を利用することを生かすなど、他技術との差別化が重要であると考えている。

これまで、発電のためのターゲット振動数が比較的高く、橋梁の振動エネルギーの多くは吸収されるに至っていないことから、研究の余地がまだ残っていると考えられる。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) 岩吹啓史, 佐々木栄一, 竹谷晃一, 長船寿一, 安田英明: 電磁減衰装置を有する発電型 TMD の提案と実橋梁における制振効果検証実験, 土木学会論文集 A1, Vol. 74, No. 3, pp.417-430, 2018.
- 2) 竹谷晃一, 佐々木栄一: 橋梁振動エネルギーを利用した発電装置のパラメータ設計方法と実橋梁での検証実験, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, 2017.
- 3) 竹谷晃一, 佐々木栄一, 岩吹啓史, 長船寿一, 洞宏一, 名児耶武: 橋梁振動を対象とした同調質点系発電デバイスの開発と実橋梁への適用, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), 土木学会, Vol. 72, No. 2, pp.290-301, 2016.
- 4) Kouichi Takeya, Eiichi Sasaki, Yusuke Kobayashi. Design and parametric study on energy harvesting from bridge vibration using tuned dual-mass damper systems, Journal of Sound and Vibration, Vol. 361, pp. 50-65, 2016.

【イノベーション技術の名称・タイトル】

構造物の温度差エネルギーを利用した温度差発電

【概要】

本技術は構造物を取り巻く環境の温度差を利用して発電する技術である。構造物は日射条件や熱容量が部材で異なるため、構造物内部や空気との間には温度差が生じている。熱電発電素子は温度差エネルギーを吸収して電気エネルギーに変換する半導体集積回路であり、この熱電発電素子を用いることで橋梁環境の温度差エネルギーから発電を行うものである。橋梁環境の温度差発電によって、例えばモニタリング用のセンサやIoT機器の電源供給への活用が進められているほか、鋼床版路面に埋め込むことで路面凍結の検知や、温度差エネルギーの吸収による路面凍結緩和などへの応用が期待できる技術である。

【背景、着想に至った経緯（背景）と考えられること】

センサ等を用いて劣化・損傷などを検知する構造モニタリングにおいて、長期的な電源確保が課題の一つとしてあげられている。その解決方法として注目されているのが太陽光発電をはじめとする環境発電（Energy Harvesting）である。太陽光発電は60年以上前から開発が進められており、センサへの電源供給として利用されているが、例えば橋梁では対象の構造形式によっては適用範囲に限られるなどの課題もある。一方で、太陽エネルギーを利用する別の方法として構造物の温度環境に注目すると、部材の熱容量が大きいため気温との温度差が生じやすく、構造部材間でも温度差が生じている。そこで、構造物自体の蓄熱エネルギーを発電に利用することができれば、橋梁裏面など直接日射が届かない場所に電源を供給することができると考え、研究の着想に至った。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

これまで温度差発電は、工場の排熱利用など数十～数百度の温度差を想定したものが多く、構造物の数度程度の温度差を利用する研究は少なかった。近年、熱電発電素子の性能向上も進み、より小さな温度差から発電する研究や製品開発が進められている。本研究は、構造物の中でも橋梁の温度差環境に注目し、空冷式や埋込式など対象橋梁に応じて様々なデバイスを独自に検討している。橋梁裏面に設置するタイプでは、鋼桁の下フランジやコンクリート床版の裏面温度と空気の温度差を利用し、コアでかさ上げたヒートシンクを用いた空冷式発電デバイスは特徴的な構造をしているといえる。埋め込み設置タイプでは、橋梁鋼部材と舗装の熱容量の差に注目し、鋼床版のアスファルト舗装打設時に路面内に埋め込むことで部材間の温度差を利用する埋込式発電デバイスを提案している点も独自性があるといえる。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

木嶋ら[1]は道路舗装における熱エネルギーから発電を行い、高温部が吸熱をするというペルチェ効果を用いて路面温度を下げ、気温緩和に寄与することを検討した。路盤の上に敷いた基層アスファルトに路面発電システムを埋め込み、それに表層アスファルトが被る形になっている。アスファルト内の温度勾配は一日の中で逆転するため、表層側の温度が高くなる日中においては最大で1.5℃程度の温度低下が見られた一方で、夜間では相対的に地中温度が高くなるため、路面発電システムを入れない時よりも1℃弱の温度上昇が見られた。その他にも道路舗装部に埋め込んだヒートパイプを用いて熱を取り出し、外気温との温度差をと

る研究[2]や、冷却部に河川水を用いる研究[3]などもなされており、発電量は得られるものの設置の制約が課題として挙げられる。

- [1] 木嶋健, 明嵐政司: 熱電素子で構成された路面発電システムによる気温への影響, 舗装, Vol.36, No.9, pp.28-32, 2001.
- [2] 岩本健吾, 田中勝之, 田中誠: 道路の熱を利用する熱電発電の研究, 日本大学理工学部学術講演会論文集, pp.865-866, 2014.
- [3] 上川優貴, 長谷部正基: 熱電素子による道路舗装面の熱エネルギーを利用した発電システム, 土木学会第60回年次学術講演会, pp.385-386, 2005.

【技術の内容紹介】

熱電素子(Thermo-Electric Element: TEE)は、熱電素子の両面に温度差を与えることで発電する。起電力と変換効率を高めるため、温度差で起電力を生じさせる半導体が高密度に集積されている。熱電素子の例を図1に示す。橋梁などの構造物に生じる数度程度の温度勾配で発電可能な熱電素子を簡易実験で検討した結果、低温度差でも発電可能であった図1左の熱電素子を選定した¹⁾。

A) 空冷式熱電発電デバイス

空冷タイプの熱電発電デバイスは熱電素子の片側を橋梁部材、反対側をヒートシンクと密着させた構造となっている²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。図2(a)(b)は空冷型熱電発電デバイスのプロトタイプの様式図と橋梁に設置した様子である⁴⁾⁵⁾。マグネットによる吸着固定機構としているため、鋼桁などの磁性体に容易に設置できる。事前に鋼板を付着させておくことでRC床版等にも固定可能である。図3は熱電発電デバイスの起電力と温度差の関係である⁵⁾。橋梁環境の数°Cの温度差で数百 mV の起電力が得られるため、昇圧回路や複数の熱電素子を直列接続することでIoT機器への給電も可能であると考えられる。一方で、接触面やヒートシンクにおける

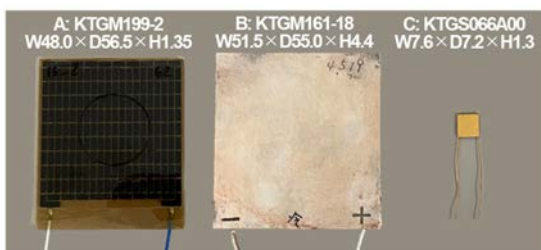


図1 熱電素子の例

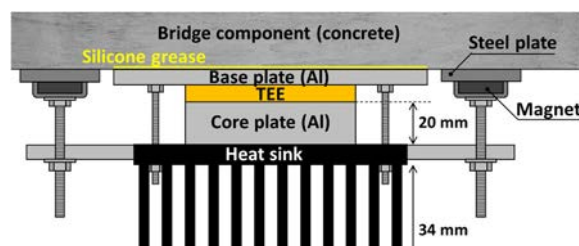


図2(a) 空冷型熱電発電デバイスの模式⁵⁾

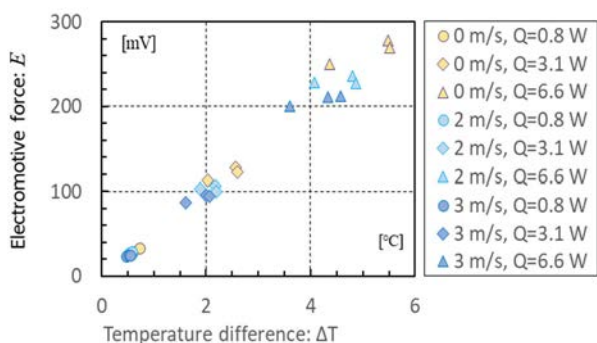


図3 熱電発電デバイスの起電力と温度差の関係⁵⁾

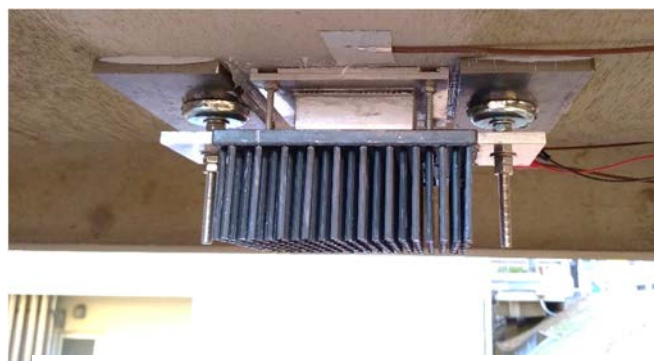


図2(b) 橋梁RC床版裏面に設置した空冷型熱電発電デバイス

熱伝達ロスが今後の課題であり、構造物への密着度をより高めた設置方法やヒートシンク形状などのさらなる検討が必要である。

B) 埋込式熱電発電デバイス

埋込式の熱電発電デバイスは、異なる構造部材間の中に埋め込むことで熱電素子両面に温度差を生じさせる構造となっている⁶⁷⁾。ここでは鋼床版橋梁を対象として、鋼床版とアスファルト舗装の温度差に着目した埋込式熱電発電デバイスを提案している。図4は対象とした実大鋼床版モデルを示しており、図5に示す横桁の有無による熱環境の違いを計測実験と、図6に示すFEMによる数値シミュレーションから検討している。その結果、横桁がある場所では鋼床版の熱がより伝わりやすいため、アスファルト舗装との界面に温度差が生じやすいことを明らかにしている。そのため、図7に示すように、横桁がある断面のほうが温度差から想定される発電量が高いことがわかる。単に熱電素子をアスファルト舗装に埋め込むと、熱が熱電素子の反対側にも回り込んでしまい温度差が小さくなる。そこで、埋込式の熱電発電デバイスでは、アスファルト舗装の熱を熱電素子上面に伝えるコアと、熱電素子下面側への熱の回り込みを防ぐ断熱層を設計に入れている。図8は埋込式熱電発電デバイスのプロトタイプであり、アスファルト舗装に埋め込みやすいようにモルタルで周囲を固めたブロック状にしている。図9は実大鋼床版モデルに熱電発電デバイスを埋め込んで発電した電圧波形である。計測環境は真冬の沖縄であったため昼夜の温度差が小さく、かつ日射が小さいため発電電圧としては1日最大100mV程度であったが、今後長期的にデータを収集して課題点を整理し、改良を図っていく予定である。

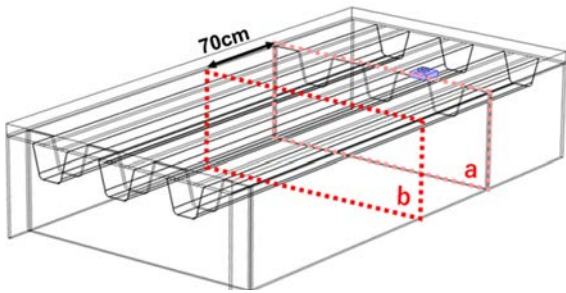


図4 対象とした実大橋梁モデル

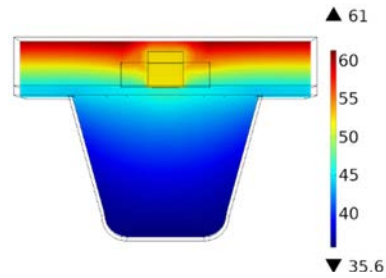


図5 FEAによる鋼床版Uリブ周辺の温度勾配

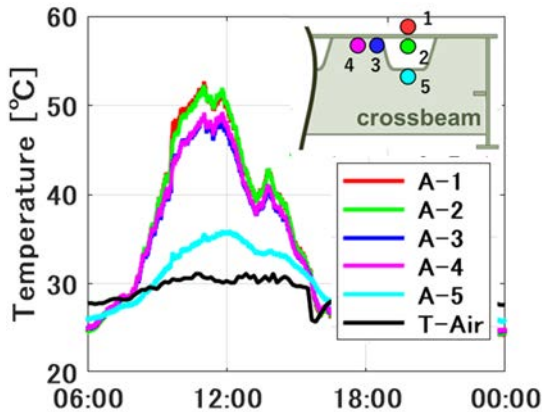


図6 実大橋梁モデルの温度計測結果

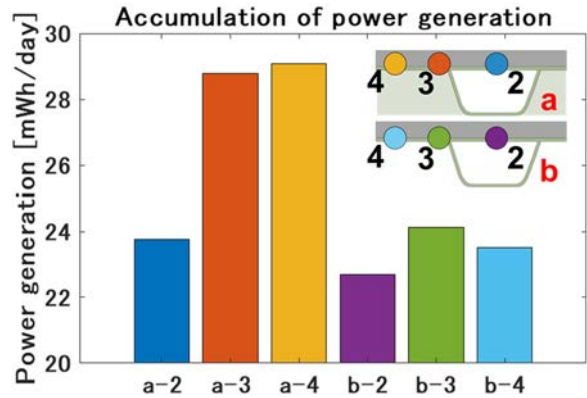


図7 FEAによる発電シミュレーション結果の比較

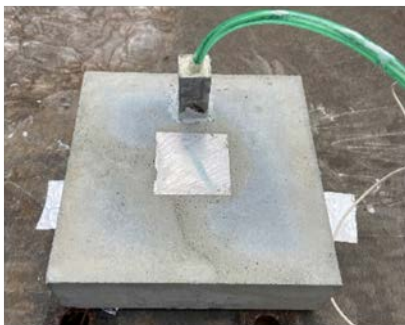


図8 埋込式熱電発電デバイスの外観⁶⁾

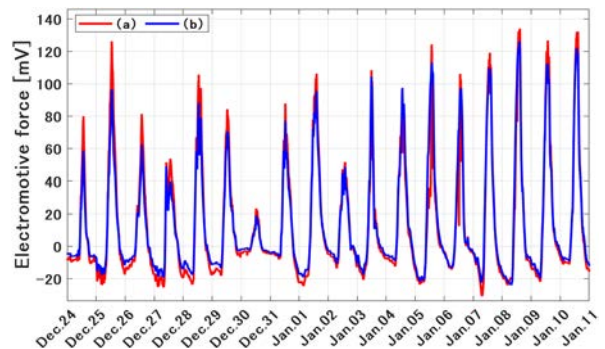


図9 実大鋼床版モデルにおける埋込式熱電発電デバイスの発電電圧波形

【技術開発時の話】

橋梁のモニタリングにおいて、特にワイヤレスセンサを設置する場合は電源供給をどうするかが必ず問題となっていた。我々は小型のソーラーパネルを取り付けることが多いが、日射が当たるようにソーラーパネルを橋桁から張り出させる必要があるため橋梁管理者側から許可が得られないケースや、設置できる場所からセンサまでの配線が長くなるとワイヤレスセンサなのに有線のような状況になることが多かった。そこで、太陽光の直達日射を利用した太陽光発電ではなく、日射によって橋梁に蓄熱された温度エネルギーに注目した。熱電素子は素子両面の温度差から発電するものであり、IoT 需要の高まりとともに低温度差で発電する研究開発が進められていた。当初、橋梁のコンクリート床版と鋼桁の温度差に着目したが既設橋梁に設置することが難しかった。そこで、気温との温度差に注目したが、ヒートシンクは空気の流れによって熱抵抗が大きく変わるため、設置位置や設置方法の検討が重要となった¹⁾。橋梁表面近くは空気が滞留するため、

スパーサーによってヒートシンクをかさ上げすることで低コストに熱効率を高めることができた²³⁾。そのほか、マグネットによる橋梁への吸着設置機構を採用し、接触圧を高めることとデバイスの着脱を容易にした⁴⁵⁾。しかし、FEMによる熱伝導シミュレーションや簡易小型風洞を用いた基礎実験の結果に比べて、実橋梁に設置したときの発電量は1オーダーほど小さい結果であり、熱抵抗が想定より大きいことが原因と考えられた。熱抵抗の原因箇所を究明して低減することができれば発電量は大きく上がる余地がある。

一方、橋梁の部材間に直接埋め込むことができれば、熱抵抗によるロスは大幅に小さくなると考え、埋込式の発電デバイスの研究を進めた⁶⁷⁾。鋼床版橋梁に注目し、アスファルト舗装の敷設時にデバイスを埋設する方法を検討した。空冷タイプとの大きな違いは、アスファルト舗装内に埋め込まれているため熱の回り込みによって発電効率が低下することである。そこで、FEMによる熱伝導シミュレーションによって断熱層の設計や、アスファルト表面からの熱伝達を高めるコア材の設計を行った。実大橋梁モデルを用いて発電実験を行っている段階である。

【技術の限界・今後の課題等】

熱電素子は開発が進められているが、変換効率の低さに起因する発電コストが課題となっている。特に低温度差では変換効率が低くなるため、温度差エネルギーに対して発電量が数%以下と小さい。実用化に向けては熱電素子自体の変換効率を高めることと、熱電素子への熱伝達ロスを削減することが重要である。一方で、橋梁などのインフラ構造物はサイズが大きいため、熱電素子の生産コストを抑えて大面積に敷設できれば変換効率の低さをカバーすることが可能である。例えば有機熱電素子は無機熱電素子に比べて変換効率が小さいが、大面積化が容易であるため、インフラ構造物での温度差発電に適している可能性がある。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) Kouichi Takeya, Mizuki Irie, Eiichi Sasaki. Experimental Study on Thermoelectric Energy Harvesting using the Temperature Distribution on Bridge Component, 13th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering (ICASP13),2019.
- 2) Seita Komori, Kouichi Takeya, Junji Yoshida. Development of Thermoelectric Energy Harvester using the Temperature Gradient between Air and Bridge Materials, IABSE Conference – Risk Intelligence of Infrastructures, pp. 90-97, 2020.
- 3) 小森 誠太, 竹谷 晃一, 吉田 純司: 橋梁の温度環境を利用した Thermal Energy Harvester(TEH)の開発, 土木学会全国大会第75回年次学術講演会, 土木学会全国大会第75回年次学術講演会講演概要集, 2020.
- 4) 竹谷 晃一, 木村 優里, 佐々木 栄一, 伊藤 裕一, 小森 誠太, 吉田 純司: 橋梁のコンクリート部材-空気間の温度差を利用したエネルギーハーベスティングの提案, 土木学会年次学術講演会, 2022.
- 5) Kouichi Takeya, Yuri Kimura, Seita Komori, Junji Yoshida, Eiichi Sasaki. Numerical and Experimental Studies on Thermoelectric Energy Harvesters using Temperature Difference in Concrete Bridges, IABSE Symposium Prague, IABSE Symposium Prague Proceedings, pp. 458-466, 2022.
- 6) 竹谷 晃一, 芦澤 那南, 阿久津 絢子, 伊藤 裕一, 佐々木 栄一, 下里 哲弘: 構造部材間の温度差を利用した熱電発電の提案と鋼床版橋梁への適用, 土木学会全国大会第77回年次学術講演会, 2023.
- 7) 竹谷 晃一, 芦澤 那南, 阿久津 絢子, 伊藤 裕一, 佐々木 栄一, 下里 哲弘: 鋼床版路面の温度勾配に着目した埋込型熱電発電デバイスの検討, 安全工学シンポジウム, 2023.

2.4 状態情報に関するプレゼンテーション技術（カテゴリー④）

定期点検では、点検員が現場で損傷区分を客観的に記録できるよう、定性的な指標が採用され、その記録は2次元の展開図へのスケッチとなることから、損傷の程度や連続性、損傷同士の関連性が把握しにくいという課題がある。加えて、診断の際には、周囲の環境や状況も踏まえて要因分析する必要があり、対象構造物のみならず、広域な情報の記録が求められる。これに対し、近年、簡易的に取得できるようになった3Dデータを活用することで、上記の課題解決が期待されている。具体的には、立体的な視覚から、損傷の広がりや把握しやすいことや、点群による周囲状況の把握など、視覚的にわかりやすいプレゼンテーションが挙げられる。

ここでは、状態情報に関するプレゼンテーション技術として、以下に示す4技術を紹介する。

- ・ 地図情報連携データクラウド Infra Studio
- ・ 3次元画像を活用した鉄道構造物の目視検査支援システム
- ・ 地下構造物・地下埋設物の3Dデータ化
- ・ 点群データの利用に関する技術

【イノベーション技術の名称・タイトル】

地図情報連携データクラウド Infra Studio

【概要】

本技術は、センシングによって得られた様々な情報をクラウド上に収集し、一括して処理・表示できるデータクラウドシステム¹である。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

近接目視点検が制度化されて日本国内の橋梁の情報が収集された。今後もデジタル化などされつつ維持管理情報を更新されていくものと予想される。一方で、インフラの寿命は100年以上と言われるなかで、維持管理に関するデータの維持管理は十分とは言い難い。点検調書などは発注単位で管理され、担当者らの業務フォルダに発注年度ごとに保管されていることが多い。さらに、担当者は数年毎に異動することが多く、情報を継続して利用できる体制が整っていない。インフラ構造物は未来永劫に特定の場所に存在するため、維持管理情報を地図上に保管する着想から、データの検索、共有を容易にするプラットフォームを実現した。

対象インフラに不具合が生じた際には、センシングなどで監視することが増えてきた。センシング機器は様々であり、複数のシステムが活用されることが多い。それぞれの機器は有益な情報を提供するが、互いに情報を参照することはできない。たとえば、「ひずみ情報」と「天候情報」が別のシステムから提供されて関係性を一目で確認できないといった状況である。デジタル化が進むにつれて情報の種類は増えているが、その整理や見せ方は不十分である。そこで、センシング情報をクラウド上に収集して一括して処理・表示できるシステムを上記プラットフォーム上に実現した。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

計測器のデータがアップロードされる際に、データの取得地点が自動で地図上に紐づけられるため、利用者は計測作業に集中することができる。事務所に戻ってからの計測値の転記によるミスなども無くなり、作業量を軽減できる。

- データ取得地点の紐付けにはGPSのほか、QRコードを利用可能とし、GPSが利用できない屋内環境での利用や、GPSの精度では不可能な近接箇所の区別も可能とした。
- データ取得時刻で時系列に自動で格納されるため、時系列グラフをボタン一つで確認でき、危険な兆候の早期把握に役立てることができる。
- ユーザーのグループ機能やアクセス設定機能により、顧客、管理者、作業員、協力会社など、利用目的が異なるメンバーが情報を共有しやすくなっている。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

国土交通省道路局では、デジタル道路地図等を基盤として各種データを紐付けるデータプラットフォーム（xROAD）の構築を進めている。このプラットフォームは、各種構造物の諸元データや、交通量や規制情報などのリアルタイム情報をAPIで提供する。よって、民間や自治体が独自で収集するデータについては、本プラットフォームが管理し、xROADとのAPI連携により、国レベルで管理する共通的なデータと組み合わせることでユーザーに提供することが可能となる。

【技術の内容紹介】

本技術は主に以下の3つの機能から構成されている。

① 保存機能

計測個所を事前登録することで、計測端末のGPSデータ、もしくは、撮影されたQRコードから自動的に振り分ける。これにより、後日のデータの取り出しや整理が不要となり、計測作業に注力できる。

② 検索機能

送信されたデータのGPS情報もしくはQRコードから、システム内に登録された計測個所に自動で紐づけされる。これにより、利用者はGoogleマップで計測個所からデータにアクセスできる。年度や担当者が変わっても、一貫した分かり易い方法でデータを探せ、いろいろな現場で繰り返し計測した場合にも、データの引継ぎが容易になる。

③ 閲覧機能

各計測データは計測個所毎に管理されているので、時系列グラフとして表示できる。また、ダウンロードしてレポート等に活用でき、元データ修正後の再登録も可能である。データを見るだけの人、変更する人と利用形態が異なる中で、アクセス範囲を自由に変更でき、関係者への共有も容易になる。

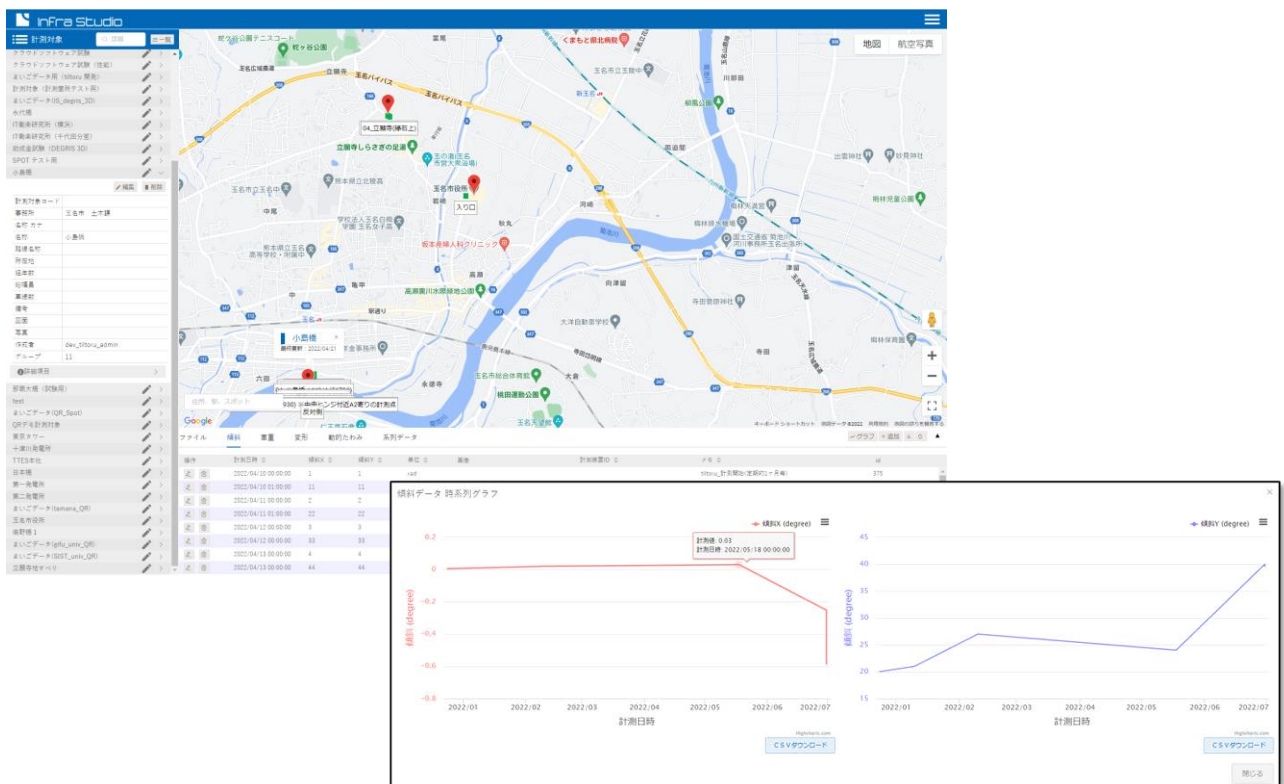


図1 システム概要

【技術開発時の話】

開発当初は、IoT化された計測端末からのデータアップロード先のクラウドであった。現場で写真やメモを残したいという要望が寄せられ、クラウドサービスとして独立させた。

【技術の限界・今後の課題等】

- 近年、維持管理分野において 3D データの活用が拡大しており、本プラットフォームにおいても 3D データへの対応が期待されている。加えて、Google マップではなく、3D データ上に計測個所を紐づけるような機能も検討していく必要がある。
- 管理組織が利用している既存のプラットフォーム、および、国土交通省の xROAD との API 連携を可能にすることで、プラットフォームの二重投資を回避することができる。加えて、橋梁台帳や維持管理台帳の管理情報と組み合わせることで、維持管理業務に対して使い易いデータを提供可能となる。
- 管理組織の情報管理体制によっては外部のクラウドを利用することが難しい場合がある。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) TTES 社 技術紹介ページ <https://ttes.co.jp/service/infra-studio/>

【イノベーション技術の名称・タイトル】

3次元画像を活用した鉄道構造物の目視検査支援システム

【概要】

構造物の検査時に撮影した動画等から、SfM（Structure from Motion）の技術を使い構造物の3次元画像を生成し、その画像を利用した幾つかの機能により目視検査を支援するシステムである¹⁾²⁾。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

鉄道構造物の目視検査では、変状を抽出することを主たる目的としていることから、検査員が変状を見つけた場合は当該箇所について詳細に写真やメモの記録を残す。一方で、変状がなかった箇所については、検査業務の多忙さから写真などの記録を残さないことが殆どである。したがって、検査後に何かがあっても再度現地に行かない限りは状況を確認することができない。また、次の検査においても、当該の構造物を熟知した検査員であれば、僅かな変化から変状の兆候を見出すこともできるが、前回の検査時に健全と判断され記録が残っていない箇所に対しては、一般の検査員がそのような僅かな変化を捉えることは困難である。

このような背景のもと、検査で目視したありのままを記録に残しておくことができれば、何かがあっても事務所にいながら構造物の状態を再確認できる、もしくは前回の構造物の状態と比較しながら検査することで変状の抽出精度を高めることができる、という観点が開発に至った経緯である。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

システムの導入しやすさに配慮している点が特徴である。老朽構造物が増加しており検査業務が多忙となっている中で、3次元画像（3次元点群データ）を取得するのに時間を要してしまうと、結局は検査員に使われない結果となる。そこで本システムでは、3次元画像の精度をある程度は犠牲にしつつも、3次元画像の生成に使われるデータの取得、すなわち構造物の動画撮影は数分程度で済むものとしている。また、特殊な器材も不要であり、動画の撮影は市販のカメラやスマホでもよく、導入コストも抑えている。

本システムのもう一つの特徴は、3次元画像を検査に役立てる幾つかの機能を有している点にある。詳細は【技術内容の紹介】で示す。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

3次元画像、もしくは3次元点群データの取得は大きく2種類あり、当該技術のように複数の写真画像から特徴点を抽出し、各特徴点の3次元座標を写真測量の原理を用いて算出する手法と、レーザーを連続的に照射し各特徴点の3次元座標をレーザーの往復に要する時間から算出する手法である。前者は、器材がカメラのみでよい反面、精度は劣る。特に、隣り合う写真のラップ量が少ない場合や、写真同士の明暗が大きく異なる場合などは、特徴点の抽出ができず点群データを構成することができないため、写真画像の撮影がその精度に大きく影響する。一方で、レーザーを利用した手法では、精度が高い利点を有するものの、器材が高額となる。したがって、検査等に利用する場合は、その3次元画像の必要精度に応じて使い分けられていることが多い。

【技術の内容紹介】

3次元画像の生成は、前述のとおり複数の写真画像から特徴点を抽出し、各特徴点の3次元座標を写真測量の原理を用いて算出するものである(図1)。本技術では、対象となる構造物の動画を数分撮影し、その動画から元となる写真を取り出している。このようにすることで、隣り合う写真のラップ量を適切に設定することができる。

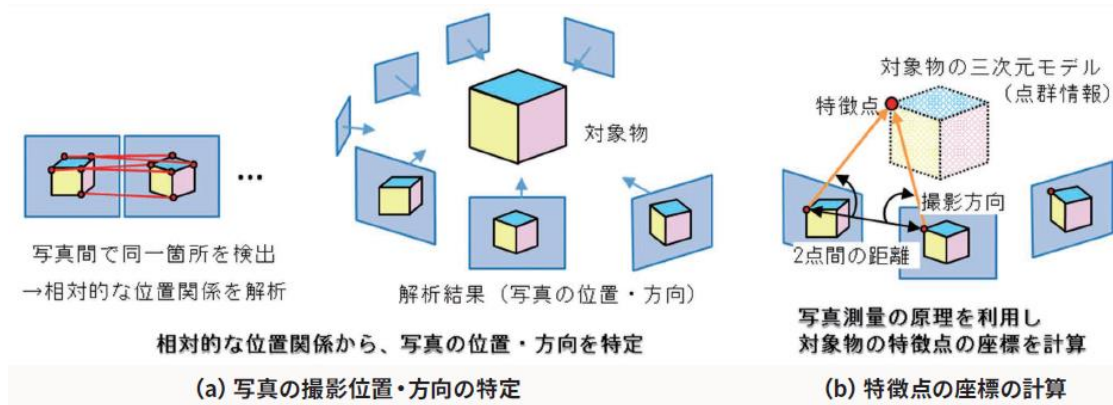


図1 SfMによる3次元画像の生成方法¹⁾

生成した3次元画像は、各種機能により目視検査に活用される。例えば、二時期の比較機能は、前回検査と今回検査の3次元画像を画面上で動きを同期させて見比べる機能(図2)で、これにより検査ごとの違い、つまり発生した僅かな変化・変状を捉えやすくするものである。また、気になった箇所については、断面形状としての比較も可能である(図2)。他にも、3次元画像上で任意の点を指定すると、その点を含む元の写真を抽出できる機能もある。これは、3次元画像上ではレンダリングされた写真で不鮮明であるため、より鮮明な写真により状態の確認を可能とすることを狙いとしている。一般に、検査で写真を撮影すると、相当量の写真が保管されるため、写真が構造物のどこを撮影しているのかを判別できるよう、黒板に箇所名を記載して同時に撮影するか、写真のファイル名を逐一箇所名に変更したりするが、それに大変な労力を要する。本機能を利用すれば、3次元画像から必要箇所の写真を抽出できるため、そのような労力が不要となる利点もある。

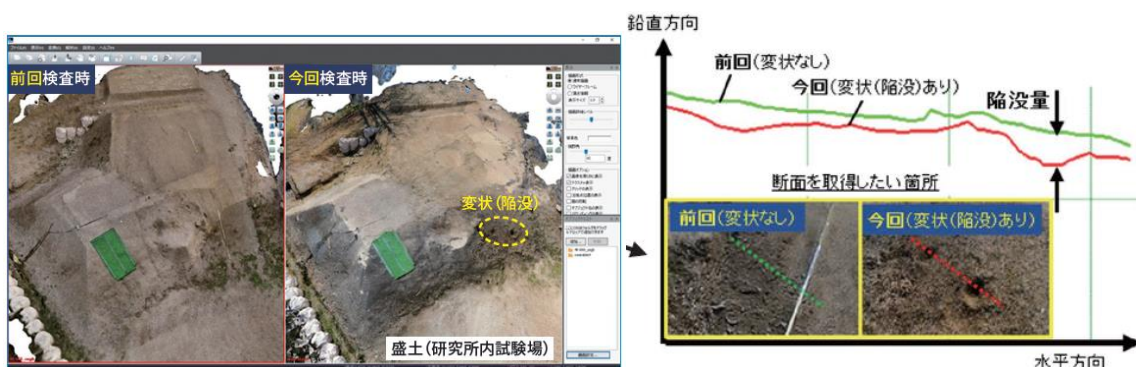


図2 二時期の比較機能¹⁾

【技術開発時の話】

SfM は使用するソフトにより、3次元画像の生成程度が異なり、ソフトごと、またカメラごとにその特性を把握していく必要があった。

【技術の限界・今後の課題等】

現状では3次元画像の生成に時間を要しており、撮影しながら3次元画像の出来形を確認できない。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) 小林裕介ほか：構造物の三次元モデル化により目視検査を支援する，RRR, Vol. 77, No. 9, pp.8-11, 2020.
- 2) 小林裕介ほか：3D デジタル可視化技術で鉄道構造物の目視検査を支援する，RRR, Vol. 78, No. 5, pp.4-7, 2021.

【イノベーション技術の名称・タイトル】

地下構造物・地下埋設物の 3D データ技術

【概要】

3D 点群計測の高度化と 3D モデル作成により、地下の見えない部分を可視化し、計画、合意形成、設計、施工、維持管理などの幅広いフェーズにおいて活用する技術である。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

3D レーザスキャナによる点群計測が幅広く行われるようになってきており、その一環としてデジタル空間に同等の構造物を構築する Virtual Twin などがある。デジタル空間であれば物理的な制限はないので、一部の非表示や透過、断面表示など自由な表現が可能である。そこで、把握が困難である地下構造物や地下埋設物を対象に点群その他の測量技術を用いて可視化した。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

公共基準点と紐づけて公共測量の精度で点群データを取得することで、点の一つ一つが緯度・経度・標高の情報を持っており、点群データを基に作成した現況平面図、現況 3D モデルは建築確認申請のベース図面として使用することが可能である。地上と地下の点群データを統合することで、工事の際に地下構造物・地下埋設物の配置を正確に把握でき、問題の発生を抑制できるとともに適切な対応が行いやすくなる。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

図 1 に示すように、点群計測の活用は多くあるが、地下構造物・地下埋設物に着目して計測し、3D モデル化している事例は少ない。

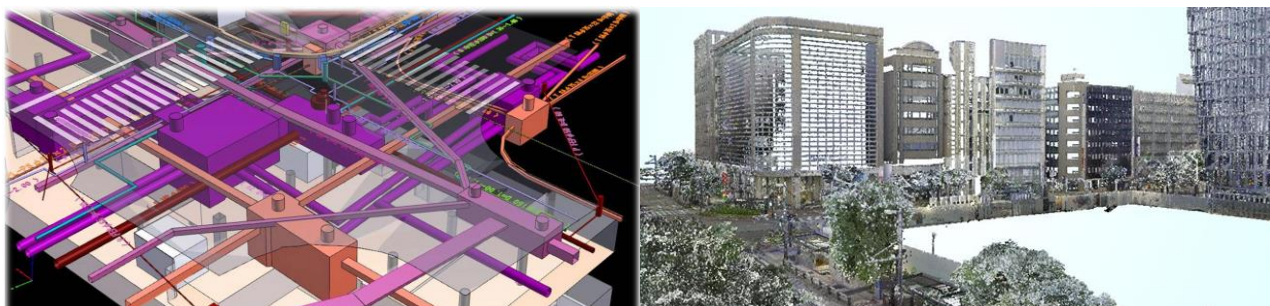


図 1 点群の取得事例

【技術の内容紹介】

この点群計測を地上から地下まで連続的に実施するとともに、データの整合性を確保するなどすることで、普段は見えない地下構造物や埋設物が3次元空間上でどのような位置にあるのかを確認・把握することができる(図2)。

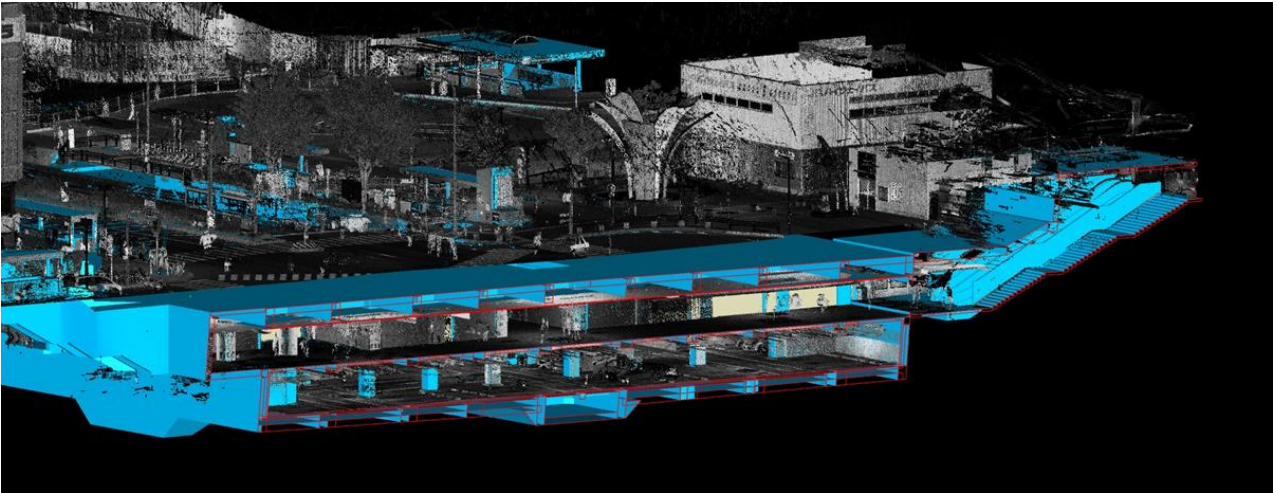


図2 地上から地下までの連続的な点群モデル

【技術の限界・今後の課題等】

点群データを細かいピッチで取得すれば、写真に近い繊細なビジュアルが得られる一方、データ量が大きくなり、取り扱いが難しくなる。点群データ自体は最新の iPhone でも取得できるようになっているので、インターネットの通信速度・データ圧縮技術、PC の性能向上、タブレットでも手軽に使用できるソフトの開発等により、誰でも点群データを作成・使用できる環境が整えば、より普及が進むことが期待される。

【イノベーション技術の名称・タイトル】

点群データの利用に関する技術

【概要】

SfM やレーザースキャナーで得た 3 次元高密度点群モデルを構造可能な FEM モデルに変換する「点群 FEM モデル」について紹介する。点群は構造物の表面に稠密に存在するので、これをダウンサンプリングして FEM の節点とする。節点を結んで断面の輪郭を作成し、これを三角形に分割して、隣の断面と連結することでソリッドモデルを構築する。このように作成した FEM モデルで実構造物の応力評価が可能になる。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

点群データは構造物の形状や位置、表面状態を正確に再現でき、施工時の干渉チェックや竣工時の出来形の確認、維持管理における目視点検の補助など、点群データを鋼構造分野で活用する試みは様々に開始されている。一方、このような点群データは、点群の状態では表面上の形状を確認することはできても構造物の耐荷性能や内部の応力状態を定量的に評価することはできない。構造物の 3 次元点群モデルを保有性能の評価に有効に活用するためには、点群モデルを FEM などの構造解析可能なモデルへ変換する必要がある。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

いまや FEM ソフトウェアを用いて橋梁の 3 次元構造設計を行うことは当然となった。一方、近年では建設分野へのデジタル技術の導入が進み、構造物のライフサイクルの各段階で 3 次元モデルを構築することが多く行われるようになった。これらの設計における FEM モデルと、BIM/CIM や点検における 3 次元モデルは、コンピュータ上の 3 次元モデルとしては同じように見えるかもしれないが、両者は本質的に異なる。FEM モデルは、あらかじめ設定した材料の構成則と形状から、構造の力と変形の間関係を計算するものである。後者は実構造物からの形状や表面の状態を 3 次元的に表現するものである。このような性格の異なる 2 つの数値モデルを結びつけ、構造物の計画、設計、維持管理のライフサイクルに一貫して適用可能な数値モデルを確立することがこの取り組みの革新性である。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

このような方法については、研究レベルでの成果が出始めている。当初は構造全体系のモデル化として BIM (Building Information Modeling) を発展させて FEM を構築した研究があった。これらの FEM モデル作成では 3 次元 CAD を経由していたり、点群からメッシュを作成する際スムージングを行っており、手順が煩雑であったり損傷や腐食などの情報が失われてしまう可能性がある。部材の損傷評価を目的とした研究では、Ghahremani et.al.¹⁾が I 桁部材の局所的な損傷を対象として 2 つの点群の差分から損傷領域を特定してソリッドモデルを更新する方法を提案している。Zhang & Lin²⁾は、Computer Vision (CV) の手法で部材の損傷部の輪郭を認識し、FEM モデルの要素を削除・修正する方法を提案し、Zhang et. al.³⁾は、点群モデルの梁をスライス状に分割した FEM モデルに変換し、色情報に基づいて認識したひび割れをモデルに挿入する方法を提案している。最近では、中溝、西尾⁴⁾が薄板部材を直角に溶接接合した部材を対象に、ハンディレーザースキャナーで点群データを取得し、シェル要素の FEM モデルの構築を行い、実寸からなる比較 FEM モデルと比較し、整合性を検証した。日高ら⁵⁾は、トラス部材を対象として、レーザースキャナーを用いた点群モデルか

ら、ファイバーモデルを構築し、載荷実験で整合性を検証した。シェル要素とファイバー要素は、前者は薄板構造、後者は柱構造のモデル化に多用されている。いずれも構造の特徴に応じた要素を採用し、低い計算コストで効率的に実構造物の性能を評価できる。本方法は、点群データからソリッド要素モデルを構築する^{6)~8)}。ソリッド要素は、計算コストは増大するが、1次元的な梁構造や2次元的な板構造もモデル化でき、形状が複雑だったり、断面が急変する箇所にも対応できる。

【技術の内容紹介】

実構造物を対象に、点群データをソリッドモデルに変換する方法を紹介する。

A) 鋼製構造物への適用と点群モデル構築

対象は図1のような鉄道橋として使用されていた鋼製の2主桁構造である。I形の圧延型鋼からなる主桁2本に溝形の横桁2本をリベットで連結しており、桁長は約2.4m、主桁間隔は約1.1mである。この構造物に対して行った静的載荷実験では、各主桁に2点載荷となるように角材を設置し、その上に図2のように質量802kg/枚の鋼板10枚を載せた。応答は支間中央の各部に貼り付けた単軸ひずみゲージで計測した。

点群モデルを作成するための撮影は以下のように行った。画像の取得は、デジタルカメラSONYTM6500を用いた。jpg形式で記録画像数は4240×2832px、撮影モードはシャッタースピード優先で1/30s、絞り値(3.5~22.0)を自動調整した。画像のノイズを低減するためISO感度を100に設定し、ピントを合わせやすくするために焦点距離を18mmに設定した。撮影は鋼桁を囲むように収斂撮影を行い、カメラを一定間隔で移動させながら桁に正対した方向と斜め方向から撮影を行った。また、主桁と横桁の連結部などの部材隅角部では、カメラを近づけて、多方向から撮影した。以上の方法で計2,417枚の画像を撮影した。

撮影した画像をAgisoft社のMetashape(ver1.6.5.11249)に読み込み、アライメントの精度を高にして低密度点群モデルを構築してから、高密度クラウドの精度を中、深度フィルターを高にして高密度点群モデルを構築した。



図1 対象構造物



図2 静的載荷試験



図3 点群モデル

図3に点群モデルを示す。主桁や横桁のみならず、ソールプレートやリベット頭までモデル化されている。桁端部などには主桁の色と異なる黒い点が見受けられる。これは、画像に写っている背景の点群で、画像枚数の増加により、カメラの位置と姿勢の推定が正しくできなかったと考えられる。以降このような点のことを外れ点と称する。外れ点は FEM モデルを構築する際に、節点と要素の生成に大きく影響するため、手動で削除したが、削除しきれない点もある。点群モデルと実構造物の寸法の誤差は最大で 6mm だった。

B) 点群モデルの FEM モデル化

図4に点群モデルから点群 FEM に変換する過程の断面形状を示す。図4a)の点群モデルの断面は、フランジとウェブ部材の隅角部が弧状となり圧延形鋼の特徴を再現できている。しかし、フランジやウェブ面上に、突出した点の集合が散見される。これが外れ点であり点群 FEM モデルの板厚に影響を与える。

点群から FEM モデルへの変換は以下の手順で行った。なお、以下の手順②で構造物を材片に分割し、⑤で連結するのは、断面形状に凹部があると隅角部にリブ状の要素が生成されることがあるため、部材を矩形の材片に分割してから処理し、最後に連結して全体の FEM モデルを構築するためである。

- ① 点群の点をボクセルグリッド法で平均化し、節点を作成する (図4b))
- ② 構造全体にセグメンテーションを行い、材片に分割する
- ③ 材片ごとに部材軸で等間隔に断面を設定し、断面ごとに輪郭を作成する (図4c))
- ④ 輪郭に2次元デローニー分割を適用し、輪郭間の節点を接続しソリッド要素を作成する (図4d))
- ⑤ 材片を連結し構造全体のソリッドモデルを構築する
- ⑥ 節点と要素を構造解析ソフトに対応するファイルに出力する

この例における具体的な設定は、①におけるボクセルグリッド法のグリッドの大きさは桁中央では 0.9mm、それ以外は 1.8mm とした。②におけるセグメンテーションの際の距離の閾値は試行錯誤的に 10mm とした。③における輪郭作成の際の閾値は材片ごとに試行錯誤的に決定し、0.7~0.85 とした。

上述の手法で FEM の節点、要素、要素座標系、材料物性値の情報を書き込んだテキストファイルを作成した。このファイルを構造解析ソフトウェア midas NFX に読み込ませ、静的解析に必要な境界条件と荷重条件は midas NFX 上で設定した。図5に得られた点群 FEM モデル、図4d)に桁中央の断面を示す。

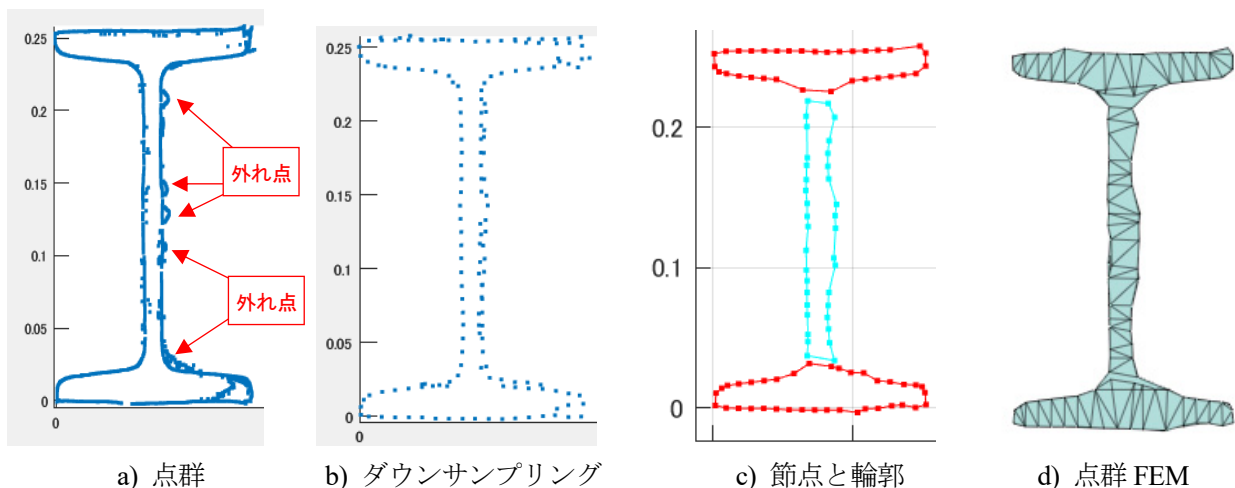


図4 断面の形状(G2 桁中央, X=1,215mm)

C) 線形静的解析による点群 FEM モデルの応力解析

点群 FEM モデルに対して、図 5 に示すように载荷実験と同様の拘束条件と荷重条件を与えた。拘束条件は点群 FEM モデルのソールプレート下面の 1 列に対して、左端は 3 軸の並進方向を完全拘束とし、右端は鉛直方向のみを拘束した。荷重条件は、鋼板を設置した角材の位置に対応する節点に、鉛直下向きに载荷した鋼板に相当する荷重を与えた。

図 6 に点群 FEM モデルの部材軸方向の垂直応力分布を示す。全体的な傾向として、主桁は上面に圧縮応力、下面に引張応力が生じている。各部の応力の傾向を検討すると、上フランジ上面の载荷位置ではその周辺より大きな圧縮応力が発生している。载荷位置より内側の支間中央部では、曲げモーメントが一定となることから上下フランジ、ウェブともに概ね一定の応力となり、ウェブでは下端から上端に向けて引張から圧縮へ変化しており、図心周辺で応力がほとんど 0 になっている。载荷位置から支点側の主桁ではフランジの応力は载荷位置から支点に向けて漸減している。このように全体的に力学的に妥当な結果となった。なお、局所的には応力のばらつきがあるが、これは形状が歪な要素が混在しているためと考えられる。

図 7 では、ひずみを計測した支間中央断面の軸方向の応力分布を比較する。まず、G1 桁の応答に着目すると、計測値が以上となった G1 桁上フランジ上面を除き、G1 桁では上フランジ下面で 35% の差、下フランジ下面で 18% の差となった。一方、G2 桁では、上フランジ上面で 7% の差に留まり、引張側の下フランジでは実測値とほぼ一致し、中立軸も近くなった。以上から、载荷実験と FEM 解析において、応力が最大となる上下フランジの応力が概ね一致し、桁内部の応力分布も整合し、中立軸を再現できていることから、本手法で構築した FEM モデルは定量的に構造物の応力を把握できる。

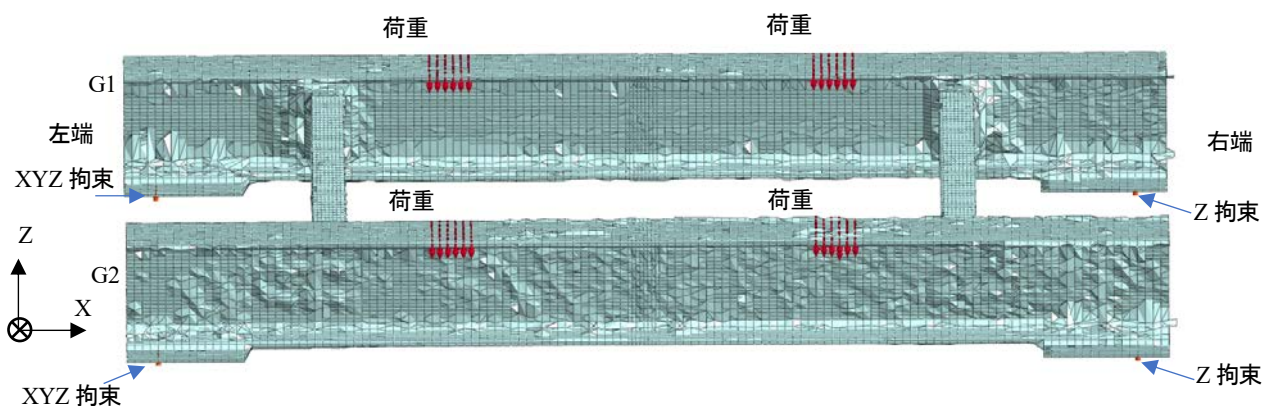


図 5 点群 FEM モデルと解析条件

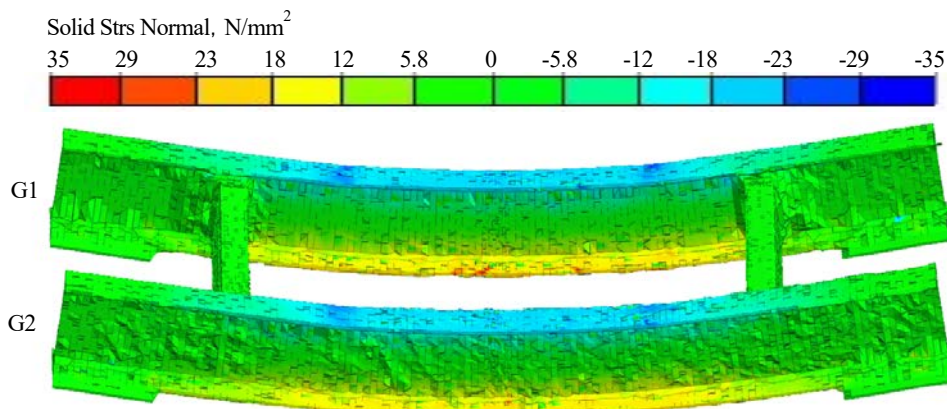


図 6 軸方向応力

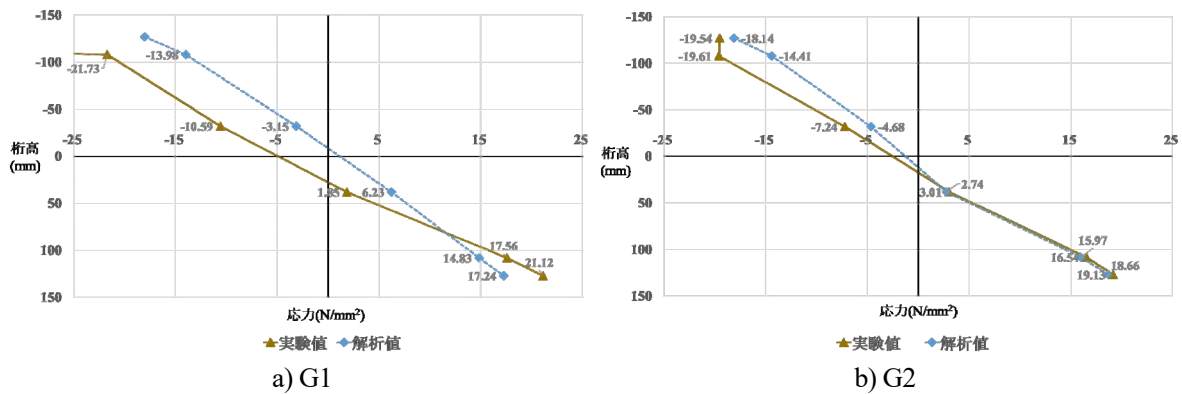


図7 中立軸の比較

【技術開発時の話】

本手法は着想も手法も単純で、手間をかけて取得した点群を、ビューワーでグルグル回転させ、拡大して感心しているだけではもったいないと感じたところが出発点である。上述したようなソリッドモデル構築の段階も単純な手法の積み重ねで構成されており、そもそも薄肉の鋼部材をソリッドでモデル化しようとしたのも、長さ・幅・奥行（厚さ）のある3次元物体ならソリッドでモデル化するのが一番単純だと考えたからである。コンピュータビジョンの権威である金出武雄先生の言葉「素人のように考え、玄人として実行（実装）する」を目指したが、玄人のレベルで実装するために手法はまだ改良中である。

【技術の限界・今後の課題等】

本手法は点群モデルをそのまま点群 FEM モデルに変換するため、点群の外れ点の影響を受けやすい。図 4d) の断面図でウェブの右面に凹凸があるのは、図 4 a) で示した点群の外れ点の影響と考えられ、外れ点の少ない点群を用いる必要がある。また、点群は表面の形状や色に関する情報で、内部の情報は得られない。コンクリート系構造物などを対象とする場合は、内部の情報を別途取得して組み合わせる必要がある。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) K. Ghahremani, A. Khaloo, S. Mohamadi, D. Lattanzi: Damage Detection and Finite-Element Model Updating of Structural Components through Point Cloud Analysis, Journal of Aerospace Engineering, Vol.31, Issue 5, 2018.
- 2) Y. Zhang, W. Lin: Computer-vision-based differential remeshing for updating the geometry of finite element model, Computer Aided Civ Inf., pp.1-19, 2021. <https://doi.org/10.1111/mice.12708>.
- 3) C. Zhang, J. Shu, K. Yu: Automated nonlinear FE analysis of damaged RC beams based on 3D point clouds, Proceedings of the 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, ABS_497, 2021.
- 4) 中溝智也, 西尾真由子: 3次元点群データからの鋼構造薄肉部材のシェル要素 FE モデル構築, AI・データサイエンス論文集, 3巻J2号, pp.786-794, 2022.
- 5) 日高菜緒, 橋本尚史, 中村真貴, 馬越一也, 野中哲也, 小畑誠: 点群データを活用した鋼橋の解析モデルの構築および精度検証, 構造工学論文集, Vol. 69A, pp.637-647, 2023.
- 6) 鈴木紗苗, 宮森保紀, 齊藤剛彦, 山崎智之, ムンフジャルガル ダンビーバルジル, 三上修一: 鋼構造部材の3次元点群モデル構築と FEM データへの自動変換に関する検討, 土木学会論文集 F3(土木情報学), 75巻2号, pp.I_141-I_149, 2019.
- 7) 吉田明燁, 宮森保紀, 齊藤剛彦: 鋼部材の点群データから FEM データへの変換における部材隅角部の要素生成に関する検討, 土木情報学シンポジウム講演集, I-3, 2022.
- 8) 吉田明燁, 宮森保紀, 齊藤剛彦: 鋼構造物の点群モデルから FEM モデルを構築するための要素生成方法の改良に関する検討, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会講演概要集, 第77巻, I-1, 2022.

2.5 状態情報を用いた状態診断（カテゴリー⑤）

構造物に生じる損傷に対しては、現地で点検員が近接目視を行い、損傷のメカニズムや関連する損傷状況、周囲の状況を鑑みて診断を行うべきである。近年、構造ヘルスマニタリング技術に期待が集まっているが、現状の技術では、人間の五感を駆使して行う近接目視を代替することは困難である。しかしながら、損傷個所のスクリーニングや、目視困難箇所の状態把握など、補助的な活用は十分に有効である。

ここでは、構造物の状態情報を取得し、診断に結び付ける技術として検討が進められている以下の4技術を紹介する。なお、2.2でまとめる計測およびデータ分析技術はセンシングの意味合いが強いが、本節ではより部材の健全性に直結した技術として取り上げている。

- ・ 鋼部材の補修・補強と状態把握を可能とする CFRP ストランドセンサ
- ・ ガイド波に着目した PC 鋼材破断検知
- ・ 超音波フェーズドアレイによる PC シース管グラウト充填評価
- ・ 振動モニタリングデータの位相空間分析による微小状態変化検出技術

【イノベーション技術の名称・タイトル】

鋼部材の補修・補強と状態把握を可能とする CFRP ストランドセンサ

【概要】

CFRP シート接着工法において、接着貼付後に構造物表面の状態が分からなくなるとい
う問題に対し、構造部材の補修・補強を行いながら、各 CFRP ストランドを状態モニタリ
ングに向けたセンサとして用いる技術である。

【背景、着想に至った経緯（背景）と考えられること】

土木構造物の補修・補強工法の一つとして CFRP シート接着工法がある。CFRP シートは
軽量でかつ比強度が高く、施工にも特殊な重機などを必要としないことから、床版やコン
クリート橋脚の補修・補強に、CFRP 接着工法が適用されている。また、コンクリート部
材のみならず、鋼橋を中心とした鋼部材への適用に向けた CFRP 接着工法に関する研究も
積極的に行われており、腐食損傷した鋼部材への適用事例もみられる。

CFRP 接着工法は、適切な設計と施工が行われれば、構造部材の応力状態を改善し、損
傷の原因となる外的因子を遮断することから、施工後に損傷が進行することを気にしなく
ても良い。しかし、ケレンを行ったにも関わらず、鋼材に塩化物イオンが残存して腐食が
再び発生する事例や対策を施したにも関わらず、疲労き裂が進展する事例がある。これら
の事例のように、CFRP シートを損傷部に貼付することで、部材の状態が分からなくなる
ことが懸念される場面がある。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

CFRP ストランドシートの特性を活かして、部材の補修・補強を行いながら、各 CFRP ス
トランドを状態モニタリングに向けたセンサとして用いるところがイノベティブな点と
言える（特許 6497169 炭素繊維強化プラスチック線材シート及び鋼構造物の補強方法）。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

これまでも、炭素繊維の電気伝導性に着目してセンサとして活用する取組みは、CFRP
ストランドを光ファイバセンサのように用いて、コンクリート構造物の損傷検出に関する
検討がある。しかし、CFRP ストランドシートで部材の補修・補強を行いつつ、各 CFRP ス
トランドでセンシングを行う取組みはない。

【技術の内容紹介】

一般的に、炭素繊維を炭素とみると、その電気抵抗率は金属と比較して100倍から1000倍も高いものの、導電性がある。さらに、CFRPシートの中でもCFRPストランドシートを活用する(図1)。これは、工場で炭素繊維と熱硬化型エポキシ樹脂を含浸、硬化させて製造したストランドをすだれ状に加工したCFRPシートである。シート内の各CFRPストランドは、エポキシ樹脂で電氣的に絶縁されているため、各CFRPストランドの電気抵抗を測定して、その変化が分かれば、貼付された部材の状態が面的に分かることになる。

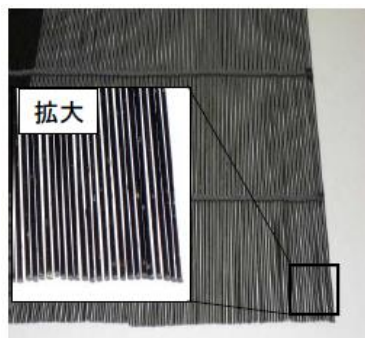
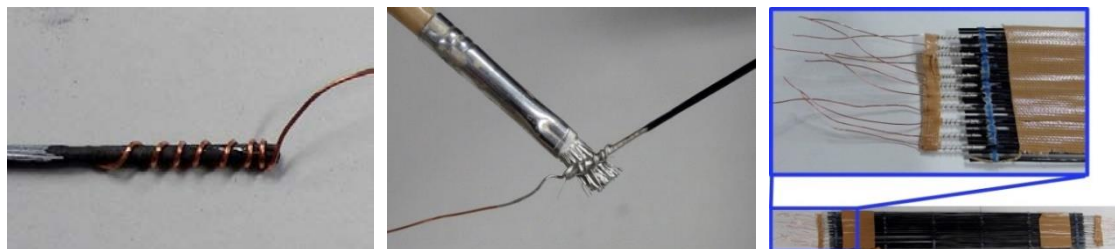


図1 CFRPストランドシート

そこで、本研究では、CFRPシート接着工法において、接着貼付後に構造物表面の状態が分からなくなるという問題に対して、CFRPストランドシートに着目し、構造部材の補修・補強を行いながら、各CFRPストランドを状態モニタリングに向けたセンサとして用いることの基礎的な研究を実施した(図2)。対象とした損傷は、鋼構造物に発生するき裂である。得られた知見を以下に示す。



(a) 銅線の取付け

(b) 導電性塗料の塗布

(c) シート状に整形

図2 CFRPストランドセンサの作成¹⁾

- (1) 種々の CFRP ストランドシートについて、シート単体の引張試験（図 3）を実施して、ひずみー電気抵抗率変化の関係を得た。その結果、パン系の中弾性 CFRP ストランドシートが、ひずみ変化に対する電気抵抗率変化の線形性が良く、状態モニタリングに向けたセンサとして適していることが分かった。
- (2) 中弾性 CFRP ストランドシートを接着貼付した鋼板の引張試験を実施して、ひずみー電気抵抗率変化の関係を得た。その結果、鋼材と CFRP シートからなる合成断面として補強効果が得られること、ならびにひずみー電気抵抗率変化の関係の傾きを補正する式を用いて同関係のばらつきを改善させることができた。
- (3) き裂損傷を模擬した鋼板に、中弾性 CFRP ストランドシートを接着して引張試験を実施した。



図 3 試験状況¹⁾

その結果、荷重が増加するにつれて、ひずみ分布と電気抵抗率変化の分布の傾向は整合した。このため、CFRP ストランドシートを用いて、鋼部材の補修・補強を行いながら、状態モニタリングを実現できる可能性が示されたと考える。

【技術開発時の話】

本研究の目的に適した CFRP ストランドを見つけ出すために、種々の CFRP ストランドに対してトライアルを行った。また、CFRP ストランドの電気抵抗率変化を計測するための端子作成では、計測誤差を低減するために、端子への導電性塗料の塗布の方法を工夫している。

【技術の限界・今後の課題等】

現場適用に向けては、効率的な端子の作成ならびに電気抵抗の測定方法、端子間距離の設定方法、測定結果を補正する方法の高精度化、温度変化の影響把握などが挙げられる。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) 宮下剛，松本大樹，秀熊佑哉，小林朗：鋼部材の補修：補強と状態把握を可能とする CFRP ストランドセンサの基礎研究，構造工学論文集 A, Vol.62, pp.537-548, 2016.
- 2) 松本大樹，宮下剛，秀熊佑哉，小林朗：特許 6436428 鋼橋の補修補強方法及び補強構造体

【イノベーション技術の名称・タイトル】

ガイド波に着目した PC 鋼材破断検知

【概要】

プレストレストコンクリート(PC)橋梁における、PC テンドン破断のリアルタイム検知および破断位置を特定する技術である。PC テンドン破断時に発生する可聴音レベルの弾性波は波長が長く、PC 構成材の板厚を越えるため、ラム波として伝搬していく。ラム波の非対称モード (A モード) を抽出することで、破断位置の特定が可能となる。

【背景,着想に至った経緯(背景)と考えられること】

プレストレストコンクリート(PC)橋梁において、PC テンダンの破断例が報告されている。PC テンダンは耐荷力の根幹を成す構成材であり、PC テンダンの破断した場合には交通流の即時コントロールが必要となり得る。PC テンダンはコンクリート躯体中に内在するように配されていることから、目視点検による発見は困難であり、漏洩磁束法や位相空間理論に基づいた打撃試験法など有益な非破壊診断手法が提案されている。ただし、これら手法は常時連続計測ではないため、点検までの期間は破断状態が放置され得る。そこで躯体表面に圧電センサを設置し、破断時発生ガイド波を動的に捕捉することで破断位置を特定する手法を検討した。

【イノベティブである(イノベティブさが含まれている)と考えられる点】

PC 橋梁のテンダンの破断ケースはポストテンション型構造に多い。ポストテンション型 PC 橋梁は適用スパンゆえに点検する範囲が大きくなる。そのため、限定的なセンサでリアルタイムに破断検知できる手法は実用の点で優位性がある。薄板中を伝搬する弾性波は板厚を波長が上回るようなケースにおいてラム波として伝搬し、多くの PC 橋梁においてラム波が発生することが想定される。ラム波は多モード性かつ速度分散性のあるガイド波であり、低減衰という特徴がある。ただし速度分散性は波動伝搬によって波形形状が変化することを意味しており、波動到達の時間評価が難しい。本技術の独自性は主要モードである A0 モードの抽出に基づく波動到達時間差を評価する点である。2次元フーリエ変換を利用して A0 モードを抽出し、主要周波数帯から主要群速度を評価することで、波動到達時間差と破断位置を求めている。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ(類似技術との比較)】

本技術は AE センシングの一つといえる。AE によって破断検知を可能とした研究はあるが、限定的なセンサ数での計測やセンシング手法の一般性については、議論の余地があった。ラム波の A0 モードは低減衰であり、A0 モードを抽出してモニタリングに適用することで限定的なセンサ数でのモニタリングを可能としている。

【技術の内容紹介】

実橋で 30 年間使用された PC 桁を用いて実証実験を行った。サンプリング速度は 100kHz、センサは 200mm 間隔に配した 6 圧電センサを 1 群として 2 群を桁端に配置した。センサ間隔については、ラム波の速度分散性から時々刻々、また破断位置からの距離に応じて桁表面に生じる面外方向波動の挙動が異なるた

め、最適なセンサ配置を提案することは難しい。ラム波はテンドン破断時に桁内で同心円上に広がる波動が桁面で反射を繰り返すことで生じる。そのため、少なくとも桁の板厚を考慮すべきと考えた。計測された波動の周波数帯は主に3~5kHzであり、ウェブ板厚80mmの速度分散曲線から想定される波数は1mあたり10以下と考えられ、100mm以上のセンサ間隔でセンシングすることが必要と考えられた。本事例では板厚の2.5倍の200mm間隔とした。

5400mmの検知区間において、破断位置の推定は、絶対平均誤差で3.2%、最大誤差率8.9%となった。

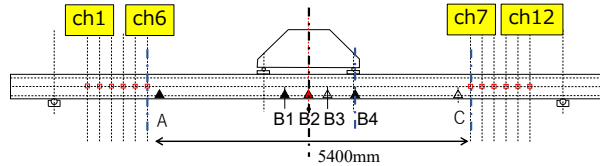


図1 センサ配置と実験用PC桁¹⁾

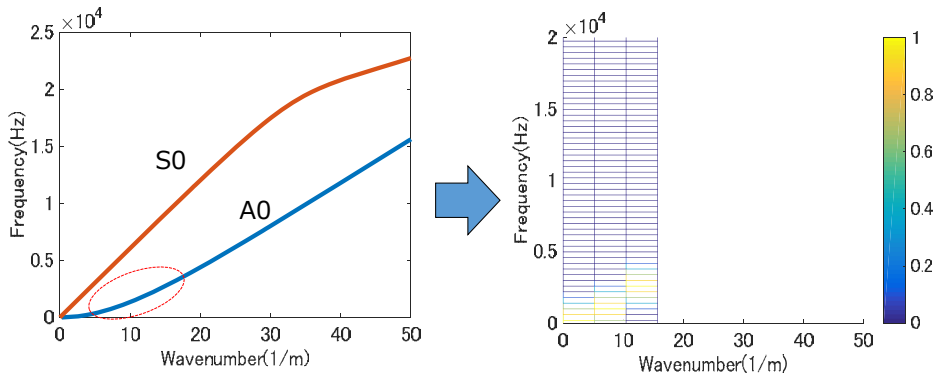


図2 A0モードの抽出¹⁾



図3 PC テンドンの破断 (動画) (<https://youtu.be/aF306N0RvAs>)

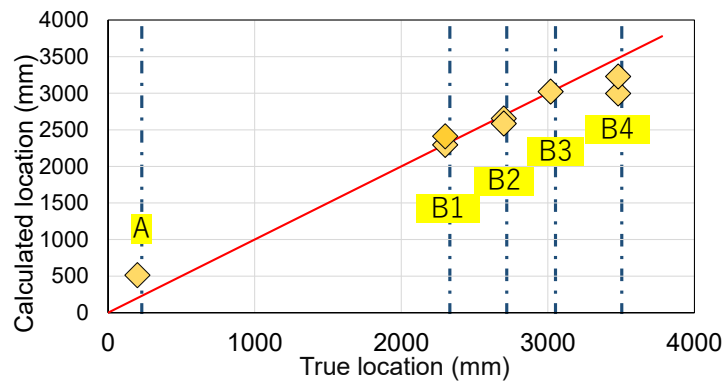


図4 破断位置の推定結果¹⁾

【技術開発時の話】

予備実験で計測した波速が安定せず、波速＝一定という認識があったため、計測手法に問題があったのかと考えていた。その後、桁の両面にセンサを配置した結果から面外方向に対称性と伴う波動と非対称性を伴う波動を示していることが分かり、同特徴を有するラム波の分析につながった。

【技術の限界・今後の課題等】

桁状の1次元的な構造物には適用が可能であるが、PCボックス桁などの2次元的に広がるPC板については、推定精度が確保できるかが課題となる。

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) 久世右近，鈴木啓悟，天谷公彦，濱岡弘二，河田直樹：PC 鋼材破断検知を目的としたリアルタイムモニタリング手法の検討，土木学会第 77 回年次学術講演会，V-42, 2022.

【イノベーション技術の名称・タイトル】

超音波フェーズドアレイによる PC シース管グラウト充填評価

【概要】

ポストテンション型プレストレストコンクリート(PC)橋梁における、PC テンドン破断の原因となっているシース管グラウト未充填検出を目的とした超音波探傷技術である。対象シース管を可視化するほか、可視化結果に対してグラウト充填、未充填を深層学習の分類器に自動判定させる。

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

異種混合材料であるコンクリートを超音波探傷する場合、波動伝搬に伴う散乱減衰が大きいため、キロヘルツオーダーの低周波領域の超音波を用いる。超音波は波長と検出解像度はトレードオフであり、波長が大きくなれば、解像度は低下する。これまで寄生的離散ウェーブレット変換を適用することにより、低周波超音波を用いつつも必要な信号を抽出し、精度よく画像化する手法を確立しており、フェーズドアレイのフォーカシングによって、その画像化レベルの向上が期待された。また画像化結果に対し、人の目による判断が難しいケースが想定されるため、深層学習による自動分類が客観的判断のうえで有益と考えた。

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

寄生的離散ウェーブレット変換を応用した寄生フィルタは、必要とする信号を抽出し、不要なノイズを除去できる有益な信号処理フィルタである。シース管界面の変化をとらえることに特化した寄生フィルタを構築した点は独自性がある。また超音波探傷の画像化結果の判定は、深層学習の分類器に判定させるが、寄生フィルタの低周波フィルタと高周波フィルタの両フィルタからの画像化結果を学習させることで、判定精度を向上させている。

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

シース管の充填・未充填の非破壊判定手法について、代表的手法として衝撃弾性波法による評価が挙げられる。衝撃弾性波法は、可聴音レベルの弾性波を入力し、波形エネルギーなどの評価を元にグラウト充填の判定を行う。実用レベルに達している手法であるが、可聴音レベルの弾性波は波の指向性が低いため、シース管の局所的な判定の点では、超音波フェーズドアレイによる評価に優位性があると考えられる。

【技術の内容紹介】

技術は、1)事前の信号処理フィルタ作成、2)学習用探傷データ蓄積、3)テスト探傷、4)深層学習による分類というステップからなる。2)学習用探傷データ蓄積と3)テスト探傷については、予め作成した寄生フィルタによる信号抽出処理を施し、シース管界面の情報に対するノイズを低減したうえで、線形化逆散乱解析による画像化まで行う。4)は画像化結果を元に分類を行う。

実橋で使用された PC ポステン T 桁試験体を用いて実証実験を行った中心周波数 50kHz の広帯域探触子を、3 個からシース管上に超音波をフォーカスし 1 個で受信した。シース管上 7 点をフォーカシングしたところ、分類精度は 83.5%を記録した。

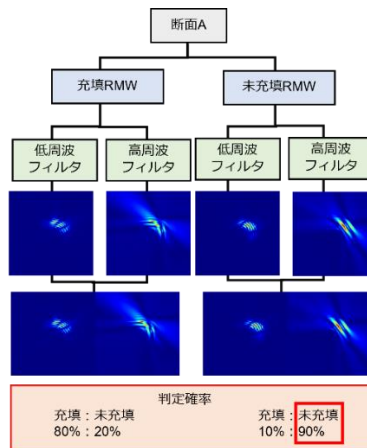
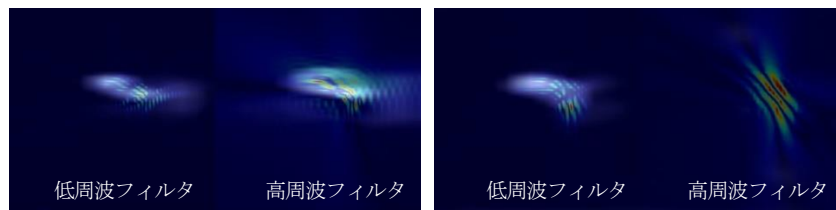


図1 検証およびテストデータ作成フロー

【技術開発時の話】

高周波フィルタと低周波フィルタ，それぞれを適用した画像を左右に並べ，両特徴を学習させることで精度向上に繋がった．分類上，画像情報の着目点を可視化できる Grad-CAM を適用したところ，充填状態では低周波フィルタ由来の構成像のみならず高周波フィルタの構成像も分類の着目点にしていることが判明した．これは未充填状態と対照的な結果となった．充填状態ではシース管入射点のみならず，シース管下面からも反射波が戻って来るため，時間差を以て波動が重畳することで高周波成分が生じたと考察された．



(a) 充填状態

(b) 未充填状態

図2 Grad-CAM による分類着目点の可視化



(a) 充填状態

(b) 未充填状態

図3 想定反射経路

【技術の限界・今後の課題等】

VGG16 の深層学習分類器に関するファインチューニングや，良好な探傷データの蓄積が精度向上に貢献すると思われる．

【技術の情報が得られる文献（論文等）】

- 1) 角田貴也，鈴木啓悟：コンクリート内在欠陥を対象とする線形化逆散乱解析の再構成像高精度化，土木学会論文集 A2, Vol.75, No.1, pp.23-36, 2019.

【イノベーション技術の名称・タイトル】

振動モニタリングデータの位相空間分析による微小状態変化検出技術

【概要】

振動モニタリングデータ，例えば加速度の時系列データに対して，位相空間の再構成を行い¹⁾，位相空間上の軌跡形状の変化を定量評価することで，微小な振動特性変化，構造特性変化を捉えようとするデータ分析手法である．加速度データのある時間区間とそれから一定の時間遅れた時間区間のデータの関係プロットした際の軌跡形状は，振動数，減衰，新しい振動成分の追加などにより変化する．位相空間上の軌跡形状の変化は，参照とする時点での軌跡形状からのずれ（距離）を求め，その分布などを求め，それをインデックス化することにより，微小な変動を捉えることを可能とする．従来よりインデックスとして用いられている振動数や減衰などよりも敏感に振動特性の変化に応答する特徴があることが確認されている．

【背景,着想に至った経緯（背景）と考えられること】

動的なデータへの位相空間分析の適用は，これまでも検討されてきていたが，損傷に伴う振動数変化が顕著でない場合もあり，特に PC ケーブルの損傷に伴う PC 橋梁の振動特性の変化を捉えることは，振動計測では難しいという状況があった．そこで，振動数や減衰といった従来のインデックスと異なるより高感度なインデックスを構築できないかと考えたうえで，金属の疲労問題への適用等の適用事例のあった位相空間分析の適用を考え，適切なインデックスの検討を進めることとした．位相空間上の軌跡形状の重心位置の移動量，傾きの変化などを検討したが，軌跡形状変化そのものを評価する，CPST（Change of Phase Space Topology）という考え方²⁾も提示されるようになり，参照とする軌跡形状からのずれ（距離）を求め，その分布，平均値などがインデックスとして適切である可能性が確認されてきた．近年，それらに加えて，ずれの分散も重要であるという結果も得られつつある．橋梁の支承部の損傷や特性変化などの検出にも適用できる可能性があると考えられ，検討が進められている．

【イノベティブである（イノベティブさが含まれている）と考えられる点】

振動モニタリングデータの分析において，従来から用いられてきたインデックスとして，振動数や減衰があげられるが，このようなインデックスにおいては損傷の発生や進行に伴う，インデックスの変化が小さく，変化や異常の検出において課題があったが，同じ振動モニタリングデータを用いても，位相空間における軌跡形状に着目し，その形状変化を定量化する考え方を適用，応用し，橋梁の変状検出に適した高感度なインデックスを提示している点で，有益な知見と言える．

【関連する国内外の研究動向・位置づけ（類似技術との比較）】

位相空間の軌跡形状の変化を画像の変化として捉え，機械学習により変化検出を行う検討もなされているが，当該技術では，軌跡形状の変化を軌跡形状のずれとして，計測点全てを用いて，ずれを検出しようとする考え方に基づいており，既に PC 桁モデルでの PC ケーブル破断検出への適用性が確認されているなど，有用性が示されつつある．

【技術の内容紹介】

図 1 に振動モニタリングデータ（加速度）に対する位相空間分析の手順を示している。加速度の時系列データから、位相空間を再構成し、位相空間上での軌跡形状（Phase space topology）の変化を把握するため、様々なインデックスが検討されている。現状、CPST と呼ばれるインデックスが有効であるとされている。これまで図 2 のように、PC 桁を対象とした検討などに適用され、検出困難であった PC ケーブルの破断の検出の可能性を示している。振動数や減衰などの従来着目してきた指標と比べ感度が高いことなどが確認されている（図 3）。鋼橋に対する適用も進められている。

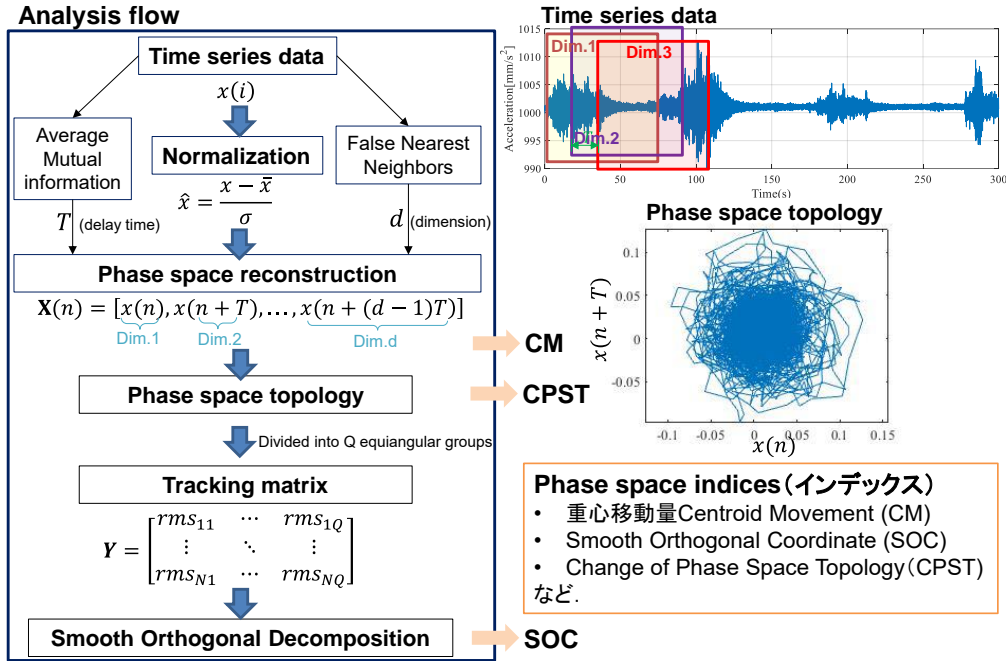


図 1 位相空間分析の流れ



図 2 位相空間分析の適用を検討した PC 桁（文献 3）、4）で検討

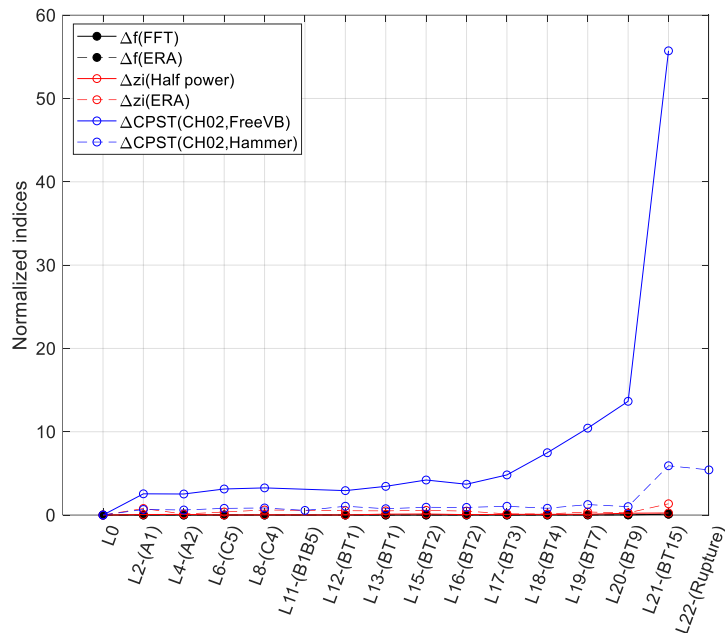


図3 PC 鋼線の損傷進行に伴うインデックスの変化 (文献4)で検討

【技術開発時の話】

振動モニタリングデータを位相空間で再構成をして描かれる軌跡形状に、振動特性の変化は敏感に表れるであろうことは可能性として考えられたが、軌跡形状の変化をどのように定量的に扱うか、どのようなインデックスが適切であるかといった点で、難しさがああり、様々な指標を試したが、うまくいかず、Nie ら²⁾が提示していた軌跡形状の変化の評価の仕方を参考として、計測のサンプリングレートの影響などを検討して、PC 桁の PC ケーブル破断の検出を可能とする仕組みとすることとなった。その後、軌跡形状のずれ量の分布などにも情報が含まれている可能性を確認できつつあり、その検討を進めているところである。

【技術の限界・今後の課題等】

現状、高感度に変状検出、軌跡形状の変化としての検出を行うためには、軌跡形状のずれに関するデータ量を増やすため、サンプリングレートが通常より高めに設定し、1000Hz などとするのが望ましいことがわかっているが、100Hz や 200Hz とした場合での変状検出性能の向上等、今後の課題となっている。

【技術の情報が得られる文献 (論文等)】

- 1) F. Takens: Detecting Strange Attractors in Turbulence, Springer Lecture Notes in Mathematics, pp.366-381, 1981.
- 2) Z. Nie, H. Hao, and H. Ma: Structural damage detection based on the reconstructed phase space for reinforced concrete slab: Experimental study', Journal of Sound and Vibration, vol. 332, no. 4, pp. 1061-1078, 2013.
- 3) P. Tuttipongsawat, E. Sasaki, K. Suzuki, M. Fukuda, N. Kawada, K. Hamaoka: PC Tendon Damage Detection Based on Phase Space Topology Changes in Different Frequency Ranges, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.17, pp. 474-488, 2019.
- 4) P. Tuttipongsawat, E. Sasaki, K. Suzuki, H. Kaneko, M. Hara, K. Hamaoka, K. Amaya, K. Takase, T. Kuroda, M. Fukuda, Y. Ikawa: PC tendon damage detection based on change of phase space topology, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.16, pp. 416-428, 2018.